



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i  
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# TREBALL FINAL DE GRAU

**TÍTOL DEL TFG:** Requeriments de latència en xarxes xG per a vehicles autònoms

**TITULACIÓ:** Grau en Enginyeria de Sistemes de Telecomunicació

**AUTOR:** Marc Ezponda Aycart

**DIRECTOR:** Lluís Jofre Roca

**DATA:** 3 de febrer del 2019



**Títol:** Requeriments de latència en xarxes xG per a vehicles autònoms

**Autor:** Marc Ezponda Aycart

**Director:** Luís Jofre Roca

**Data:** 3 de febrer del 2019

## Resum

L'objectiu d'aquest TFG és analitzar els valors de latència en les xarxes de comunicació aplicades als vehicles autònoms. Hem introduït els principals sensors del vehicle i el diferents graus d'autonomia.

Els sistemes de comunicacions actuals han estat dissenyats per transmetre veu i dades. Aquests tenen uns retards que són de l'ordre de centenars de mil·lisegons, valor que no és suficient per evitar que dos vehicles que circulen a una velocitat mitjana o elevada impactin.

S'han presentat els diferents tipus de comunicació en el que el vehicle autònom es veurà involucrat. Perquè el vehicle autònom pugui circular de forma segura haurà de realitzar diferents tipus de comunicacions tant amb altre vehicles com amb la infraestructura, cadascuna d'aquestes comunicacions tenen uns requeriments específics de latència.

En el treball s'han analitzat els retards del LTE ja que és la xarxa predominant actual. Per tal de demostrar que aquests valors no són suficients per a les diferents aplicacions futures del vehicle autònom. Per garantir la seguretat entre vehicles es necessiten comunicacions de molt baixa latència. S'han avaluat possibles millores per tal de reduir la latència del LTE.

S'han realitzat càlculs de latència de la comunicació V2I a partir de la SNR i BLER amb comunicacions amb LOS i NLOS. També s'ha realitzat el càlcul de latència per a l'escenari de l'Eixample de Barcelona a partir de la potència transmesa d'una estació base.

S'ha conclòs que l'actual xarxa LTE no és capaç de garantir els nivells de latència establerts per el 3GPP per a comunicacions de molt baixa latència. Aquests s'assolirà amb la pròxima arribada de la xarxa 5G en que l'ordre de magnitud del retard arribarà al valor desitjat ja que uns dels seus casos d'ús per al que ha estat dissenyat són les comunicacions del tipus URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communications).

**Título:** Requerimientos de latencia en redes xG para vehículos autónomos

**Autor:** Marc Ezponda Aycart

**Director:** Luís Jofre Roca

**Data:** 3 de febrero del 2019

## Resumen

El objetivo de este TFG es analizar los requerimientos de latencia en las diferentes redes de comunicación aplicadas a los vehículos autónomos. Hemos introducido los principales sensores y sus diferentes grados de autonomía.

Los sistemas de comunicaciones actuales han sido diseñados para transmitir voz y datos. Estos tienen unos retardos que son del orden de cientos de milisegundos, valor que no es suficiente para evitar que dos vehículos que circulan a una velocidad media o elevada colisionen.

Se han presentado los diferentes tipos de comunicación en el que el vehículo autónomo se verá involucrado. Para que el vehículo autónomo pueda circular de forma segura deberá realizar diferentes tipos de comunicaciones con vehículos y estaciones

En el trabajo se ha analizado los retardos del LTE ya que es la red predominante actual. Demostrando que estos valores no cumplen para las diferentes aplicaciones futuras del vehículo autónomo. Para garantizar la seguridad entre vehículos se necesitan comunicaciones de muy baja latencia. Se han evaluado posibles mejoras para reducir la latencia del LTE.

Se han realizado cálculos de latencia de la comunicaciones V2I a partir de la SNR y BLER con comunicaciones LOS y NLOS. También se ha realizado el cálculo de latencia para el escenario de la Eixample de Barcelona a partir de la potencia transmitida de una estación base.

Se ha concluido que la actual red LTE no es capaz de garantizar los niveles de latencia establecidos por el 3GPP para comunicaciones de muy baja latencia.

Estos se lograrán con la aparición de la red 5G cuyo orden de magnitud del retardo llegará al valor deseado ya que unos de los casos de uso para el que ha sido diseñado son las comunicaciones del tipo URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communications).

**Title:** Latency requirements on networks xG for autonomous vehicles

**Author:** Marc Ezponda Aycart

**Director:** Luis Jofre Roca

**Date:** February 3 rd 2019

## Overview

The objective of this TFG is to analyze the latency requirements in the different communication networks applied to autonomous vehicles. We have introduced the main sensors and their different levels of autonomy.

The current communication systems have been designed to transmit voice and data. They have delays that are of the order of hundreds of milliseconds, a value that is not enough to prevent two vehicles travelling at medium or high speed from crash.

We showed the different types of communications where the autonomous vehicle will be take part. For the autonomous vehicle safety drive it must carry out different types of communication with other vehicles and base stations.

In this work, LTE delays have been analyzed to demonstrate that these values do not fulfil the different future applications of the autonomous vehicle. To ensure safety between vehicles, very low latency communications are required. Possible improvements have been evaluated to reduce LTE latency.

V2I communication latency has been performed from the SNR and BLER with LOS and NLOS communications. Latency calculation for the scenario of Eixample in Barcelona has been carried out based on the transmitted power of the station.

It has been concluded that the current LTE network is not able to guarantee the latency levels established by the 3GPP for very low communications.

With the appearance of the 5G network the order of magnitude of the delay will reach the desired value since one of the cases of use for which it has been designed are communications of the URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communications).

*Vull dedicar aquest TFG a totes les persones que m'han escoltat i ajudat durant la realització del projecte. Amics de tota la vida i bons companys de feina m'han donat energia en tot moment i tot tipus de recomanacions per tal de què el projecte em fos lo menys feixuc possible.*

*Al tutor del projecte per la seva guia, ajuda i dedicació. Ha sigut capaç de transmetre que aquest projecte no és un treball més com els que havia realitzat fins el dia d'avui. En tot moment me sentit ben aconsellat i motivat fins el dia de l'entrega final.*

*Finalment el vull dedicar a la meva família, en especial als meus pares, al meu germà, a la cosina de la meva mare i la meva parella. Tots ells de diferents formes m'han ajudat en la realització del projecte, des de dubtes gramaticals, com traslladar la realitat a una expressió matemàtica o simplement amb la seva paciència, confiança i amor. Espero que tots ells es sentin tant orgullosos de mi com jo d'ells.*

## Índex d'acrònims

ADAS	Advanced Driver Assistance System
ADS	Automated Driving System
CDMA	Code-Division Multiple Access
BLER	Block Error Rate
DARPA	Defence Advanced Research Projects Agency
DSRC	Dedicated Short Range Communications
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
eMBB	enhanced Mobile Broadband
eNB	Evolved Node B
FDD	Frequency Division Duplex
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System Mobile
HSPA	High-Speed Packet Access
IMU	Inertial Measurement Unit
LIDAR	Light Detection Error
LTE	Long Term Evolution
MC	CDMA - Multi-carrier Code-Division Multiple Access
MCS	Modulation Coding Scheme
MC-CDMA	Multi-Carrier Code-Division Multiple Access
mIoT	massive Internet of things
MPLMN	Multi Public Land Mobile Network
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
RAT	Radio Access Technology
RADAR	Radio Detection and Ranging
RB	Resource Blocks
RSU	Road Side Unit
SNR	Signal to Noise Ratio
TDD	Time Division Duplex
TTI	Transmission Time Interval
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UNECE	United Nation Economic Commission for Europe
URLLC	Ultra-Reliable Low Latency Communications
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2N	Vehicle to Network
V2P	Vehicle to Pedestrian
V2V	Vehicle to Vehicle
3GPP	Third Generation Partnership Project

# ÍNDEX

<b>1. INTRODUCCIÓ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Història del vehicle autònom.....	1
1.2. Conjunt de sensors del vehicle autònom .....	3
1.2.1. Càmeres òptiques .....	3
1.2.2. LiDAR .....	4
1.2.3. Global Positioning System (GPS) + Inertial Measurement Unit (IMU) .....	4
1.2.4. RADAR .....	5
1.2.5. Ultrasons.....	5
1.3. Nivells d'autonomia.....	6
1.4. Previsions del desplegament del vehicle autònom .....	6
<b>2. REQUERIMENTS DE LATÈNCIA DEL VEHICLE AUTÒNOM .....</b>	<b>8</b>
2.1. Tipus de comunicació segons el servei.....	8
2.2. Escenaris de comunicació V2X.....	9
2.3. Requeriments de latència en escenaris V2V .....	10
2.3.1. Vehicles en comboi .....	10
2.3.2. Conducció avançada .....	11
2.3.3. Extended sensors.....	12
2.3.4. Conducció remota .....	13
2.4. Latència entre vehicles segons la velocitat.....	13
2.5. Altres situacions de requeriments de latència.....	16
<b>3. REQUERIMENTS DE LATÈNCIA EN LES XARXES.....</b>	<b>18</b>
3.1. Evolució de les xarxes 1G-4G .....	18
3.2. Retards en la comunicació LTE .....	19
3.2.1. Retard del pla de control de IDLE a ACTIVE .....	21
3.2.2. Retard de transició de Dormant a Actiu .....	24
3.2.3. Senyalització UL i DL .....	28
3.2.4. Retard del pla d'usuari.....	31
3.3. Anàlisis del retard segons l'estat .....	34
<b>4. TÈCNiques DE REDUCCIÓ DE LA LATÈNCIA EN LTE .....</b>	<b>36</b>
4.1. Nova estructura de trama .....	36
4.2. Esquemes de retransmissió HARQ i HARQless .....	37
4.3. Avaluació de la latència del pla d'usuari .....	38
4.3.1. Pla d'usuari DL amb Retransmissió HARQ i HARQless .....	38
4.3.2. Pla d'usuari UL amb Retransmissió HARQ i HARQless .....	40



<b>5.</b>	<b>AVALUACIÓ DEL RETARD PER A V2I EN ESCENARIS REALISTES .</b>	<b>42</b>
5.1.	BLER-SNR-RETARD .....	42
5.2.	Simulació Eixample .....	47
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONS I TREBALLS FUTURS .....</b>	<b>51</b>
6.1.	Conclusions .....	51
6.2.	Treballs futurs.....	52
<b>7.</b>	<b>ANNEX A: PILA DE PROTOCOLS LTE .....</b>	<b>53</b>
<b>8.</b>	<b>ANNEX B: LTE SCHEDULER .....</b>	<b>54</b>
<b>9.</b>	<b>Bibliografia.....</b>	<b>55</b>

## Índex de figures

Figura 1.1 Sensors del vehicle autònom[2] .....	3
Figura 2.1 Tipus de comunicacions V2X .....	9
Figura 2.2 Intercanvi de missatges.....	14
Figura 2.3 Distàncies entre vehicle i carril .....	15
Figura 2.4 Relació entre velocitat i latència.....	16
Figura 3.1 Pla de control LTE.....	20
Figura 3.2 Principals retards en la comunicació LTE .....	21
Figura 3.3 Establiment del pla de control .....	22
Figura 3.4 Transició UL amb UE sincronització.....	24
Figura 3.5 Transició UL amb UE sense sincronització .....	26
Figura 3.6 Transició DL amb UE sense sincronització .....	27
Figura 3.7 Senyalització en UL.....	29
Figura 3.8 Senyalització en DL.....	30
Figura 3.9 Latència pla d'usuari .....	31
Figura 3.10 Anàlisi del retard en diferents casos.....	34
Figura 4.1 Estructura subtrama LTE .....	36
Figura 4.2 Estructura Slot i Subslot LTE .....	37
Figura 4.3 Procediment HARQ.....	37
Figura 4.4 Procediment HARQless .....	38
Figura 5.1 Relació SNR / BLER amb NLOS a 30 km/h .....	42
Figura 5.2 Relació SNR-BLER amb LOS a 120 km/h .....	43
Figura 5.3 Relació SNR-Retard en DL a 30km/h amb NLOS .....	45
Figura 5.4 Relació SNR-Retard en UL a 30km/h amb NLOS .....	45
Figura 5.5 Relació SNR-Retard en DL a 120km/h amb LOS.....	46
Figura 5.6 Relació SNR-Retard en UL a 120km/h amb LOS.....	46
Figura 5.7 Escenari d'intersecció en l'exemple de Barcelona[14].....	47
Figura 5.8 Nivell de potència[14].....	48
Figura 9.1 Capes del pla d'usuari LTE .....	53

## Índex de taules

Taula 2.1. Casos vehicles en comboi.....	10
Taula 2.2. Casos de conducció avançada.....	11
Taula 2.3. Casos de Extended sensors.....	12
Taula 3.1. Latència segons generació.....	19
Taula 3.2. Retards en el pla de control.....	22
Taula 3.3. Retard transició UL amb UE sincronitzat.....	24
Taula 3.4. Retard de transició UL amb UE sense sincronització.....	26
Taula 3.5. Retard transició DL amb UE sense sincronització.....	27
Taula 3.6. Senyalització en UL.....	29
Taula 3.7. Senyalització DL.....	30
Taula 3.8. Retards pla d'usuari amb configuració FDD.....	32
Taula 3.9. Retards pla d'usuari en UL amb configuració TDD.....	33
Taula 3.10. Retards pla d'usuari en DL amb configuració TDD.....	33
Taula 4.1. Latència en el pla d'usuari en DL amb HARQ.....	39
Taula 4.2. Latència en el pla d'usuari en DL amb HARQless.....	39
Taula 4.3. Retards en el pla d'usuari en UL amb HARQ.....	40
Taula 4.3. Latència en el pla d'usuari en UL amb HARQ.....	41
Taula 4.4. Latència en el pla d'usuari en UL amb HARQless.....	41



# 1. INTRODUCCIÓ

## 1.1. Història del vehicle autònom

Durant la dècada del 1920 es van realitzar els primers prototips de vehicles autònoms, aquests difereixen molt dels vehicles autònoms actuals ja que aquest depenien en gran mesura d'informació que rebien de l'exterior (no percebuda per el propi vehicle). Un dels primers models va ser creat per Houdia Radio Control al 1925. Aquest vehicle era controlat per un segon que el seguia des d'una distància propera.

En la dècada del 1950 l'electricitat era l'energia escollida per la conducció autònoma. Gràcies al desenvolupament de sensors dissenyats per RCA Labs es va poder detectar la ubicació i velocitats d'altres vehicles.

Durant la dècada del 1960 es van iniciar múltiples projectes de diferents organitzacions com la universitat de Ohio, l'oficina de carreteres públiques dels Estats Units (actual Federal Highway Administration) o la corporació Bendix. Aquestes organitzacions es van centrar en el desenvolupament de l'electrònica necessària per proporcionar la informació requerida per al vehicles autònoms.

El vehicle autònom era més estable que un conductor humà durant els assajos, els diferents informes predeien que es podrien arribar a prevenir un 40% dels accidents de tràfic però aquestes tecnologies no es van arribar a expandir lo suficient perquè s'adoptessin a la via pública.

Durant aquest mateix moment històric van començar a aparèixer els primers sistemes autònoms de funció específica. El control de creuer al 1958 o el sistema antiblocatge dels frens ABS el 1971 van ser implementats en el cotxe Imperial de la marca Chrysler.

Alhora durant els anys 60 i 70 es va començar a desenvolupar el carro de Standford (Standford Cart) junt amb la tecnologia de processament de vídeo que s'utilitzaria per proporcionar informació als vehicles autònoms. Gràcies a una càmera de televisió giratòria el mòbil era capaç de processar entre 10 i 15 imatges per metre. El 1979 aquest mòbil va creuar una habitació plena de cadires en 5 hores.

Durant la següent dècada van aparèixer els primers vehicles autònoms tal i com els entenem avui en dia. Aquests vehicles estan equipats amb el conjunt de sensors, processadors i equipament necessari per conduir a traves del tràfic d'una carretera.

Ernst Dickmanns pioner dels vehicles autònoms i professor de la universitat de Bundeswehr va se el encarregat de liderar un equip amb l'objectiu de convertir una camioneta Mercedes-Benz en una camioneta autònoma. Aquesta va ser capaç de processar la informació visual captada per les càmeres, enviar les

comandes de gir al volant i les comandes d'acceleració o fre a cadascun dels pedals en funció de la situació, va arribar a assolir velocitats de 96km/h.

Les organitzacions governamentals van invertir en aquesta tecnologia per aconseguir carreteres més segures. El projecte *Eureka Prometheus* en el que Dickmanns va participar va finalitzar el 1995, van realitzar gairebé 2000km, assolint velocitats de 130km/h de forma casi completament autònoma.

Als Estats Units el projecte de vehicles autònoms de DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) va realitzar vehicles dirigits per combinacions de LIDAR i visió per ordinador. Les universitats de Carnegie Mellon i Parma també van realitzar viatges quasi autònoms de llarga distància.

El 2004 DARPA va crear un concurs que va incentivar el desenvolupament del vehicle autònom, oferint 1 milió de dòlars per qui aconseguís que el vehicle pogués navegar per una carretera amb obstacles. Cap competidor va tenir èxit en la primera edició.

En la segona edició fins a 5 vehicles van ser capaços de completar la mateixa prova. El primer guanyador va ser Stanley, vehicle dissenyat per la universitat de Stanford i Volkswagen, utilitzant tecnologia adaptada del carro de Stanford.

Al 2007 el concurs va passar a un entorn urbà, exigint als competidors que s'integressin amb el tràfic urbà. El desafiament el van completar 6 equips, encapçalats per TARTAN Racing de Carnegie Mellon, seguit per els participants de Stanford i Virginia Tech.

Altres participants es van veure involucrats en accidents, de manera que el concurs va marcar el començament del desenvolupament del software predictiu per a la presa de decisions dels vehicles autònoms. Alhora es va prendre consciència sobre el mal que els errors d'aquest tipus de software poden comportar.

En els últims 10 anys els investigadors principals del vehicle autònom han passat de les universitats a les grans empreses de l'automoció com BMW, Volkswagen i General Motors, encara que el projecte més avançat és el projecte de Google *Self-Driving Car* iniciat el 2009.

El equip de treball de Google inclou alguns dels principals guanyadors dels concursos del DARPA. El seu software combina les dades del LIDAR y Google Maps per reconèixer la seva ubicació, utilitza l'entrada visual per càmeres i el radar per detectar vianants, vehicles i objectes propers. Aquesta informació es processa per planificar la trajectòria del vehicle amb la finalitat d'imitar el comportament d'un conductor humà.

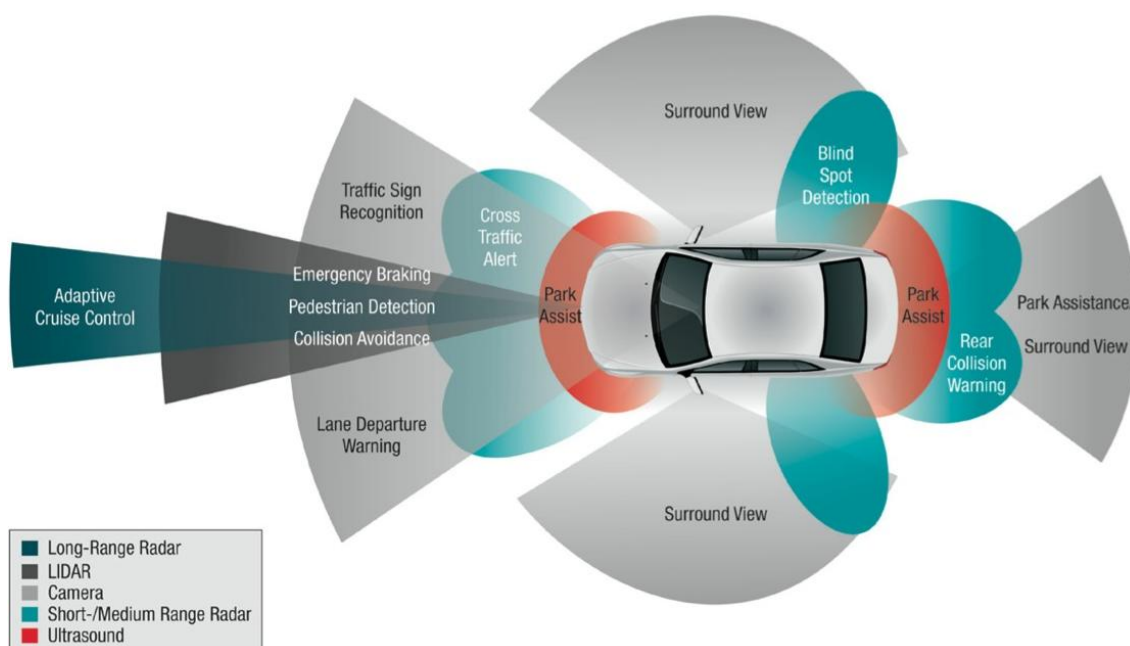
El Octubre de 2015 Tesla Motors va realitzar una millora del software per al seu vehicles Model S amb la característica del *Autopilot*. Aquesta permet que el automòbil segueixi la forma del carril, canviï de carril o estacioni per si mateix (nivell 3). Aquestes habilitats col·loquen al Model S entre els primers

automòbils autònoms a disposició del públic però encara és necessari la presència d'un conductor per mantenir les mans sobre el volant.

Tots els principals fabricants del automòbils estan planejant la seva entrada en escena, a mesura que la perspectiva de carreteres sense conductors és més concreta i que alhora la comunitat en torn a automòbils sense conductor segueix creixent. Les pròximes passes per al desenvolupament impliquen superar obstacles legislatius i realitzar suficients proves per garantir la seguretat.

## 1.2. Conjunt de sensors del vehicle autònom

Un vehicle autònom està format per diferents tipus de sensors que combinats entre ells extrauen la informació de l'entorn per tal de garantir una conducció autònoma segura. Els conjunt de sensors que conté un vehicle autònom són els següents: càmeres òptiques, LiDAR, GPS/IMU, RADAR i sensors d'ultrasons. En la **figura 1.1** es mostra el camp de visió dels diferents sensors.



**Figura 1.1** Sensors del vehicle autònom[2]

### 1.2.1. Càmeres òptiques

El sistema de càmeres òptiques està format per almenys vuit càmeres distribuïdes al voltat del vehicle. Aquestes generen imatges del seu entorn com si les veies el conductor del vehicle. Les càmeres poden detectar les llums dels

semàfors, senyals de tràfic i marques vials. Les imatges preses són a 1080p i a 60 Hz.

Les càmeres davanteres solen ser tres, tenen un angle de visió estret amb un rang de 250 metres, les de rang mitjà tenen un angle lleugerament superior arribant fins als 120 metres i per últim tenim una càmera de gran angular amb un rang de fins 60 metres.

Les dues càmeres laterals davanteres serveixen per veure els laterals on les davanteres no aconsegueixen veure per l'angle de visió i tenen un rang de 80 metres. Per últim trobem tres càmeres posteriors.

El principal inconvenient d'aquest sensor és quan el vehicle es troba en condicions de baixa visibilitat com pot ser pluja molt intensa, boira o fins hi tot quan és de nit, el rang de visió es veu molt reduït.

### **1.2.2. LiDAR**

El LiDAR (Light Detection and Ranging) és una tecnologia que consisteix en mesurar la distància a un objectiu il·luminant-lo amb una llum làser polsada i amb un sensor per mesurar aquests polsos reflectits per tal de mesurar el temps d'arribada del pols. A partir dels polsos rebuts construeix un mapa 3D de l'entorn més proper del vehicle.

L'objectiu d'aquest sensor és el de construir mapes d'alta definició per localitzar diferents vehicles que es trobin en moviment i alhora detectar obstacles. Solen tenir una precisió de 10 cm i un rang de 200 metres. Al igual que les càmeres òptiques quan es troben amb pluja densa o pols, o sigui partícules en suspensió a l'aire la seva precisió es menor.

### **1.2.3. Global Positioning System (GPS) + Inertial Measurement Unit (IMU)**

El sistema GPS/IMU s'encarrega de la localització del vehicle autònom gràcies a estimacions inercials (extrapolació de la posició a partir dels paràmetres del moviment) i actualitzacions de la seva posició global (coordenades geogràfiques i l'altitud del receptor).

El GPS és un sistema de posicionament format per una xarxa de 24 satèl·lits que és capaç de determinar la posició amb una elevada exactitud del vehicle en qualsevol punt de la Terra. Un receptor GPS necessita un mínim de quatre satèl·lits per determinar la seva posició absoluta (x,y,z) amb una exactitud d'uns dos metres.

El principal inconvenient d'aquest sistema és que necessita almenys la visibilitat de quatre satèl·lits ja que hi hauran moments durant la conducció que



no es disposarà d'aquesta visibilitat com en els túnels. Per tal de solucionar aquest problema, s'integren les mesures del GPS amb la dels sistemes de navegació inercial, anomenats INS (Inertial Navigation System), mitjançant un sensor anomenat IMU (Inertial Measurement Unit).

Els INS permet determinar la posició del vehicle a partir dels valors de la acceleració lineal i la velocitat angular mesurada per el sistema. Amb aquesta informació i la captada per sensors els udòmetres (instruments de mesura capaços de calcular la distància que recorre el vehicle) es podrà calcular la posició actual a partir de la posició inicial en la que es perd el senyal GPS.

És possible utilitzar els dos sistemes, el GPS i el IMU, per tal de millorar el guiat dels vehicles en cas de pèrdua del senyal. L'inconvenient principal d'aquest segon sistema és que els càlculs produïts només són fiables a curt termini ja que aquests es degraden amb el temps.

#### **1.2.4. RADAR**

El RADAR (Radio Detection And Ranging) envia ones electromagnètiques a freqüències de radio que al xocar amb un obstacle són reflectides, mitjançant un sensor és capaç d'extreure la distància a la qual es troba el vehicle. El senyal radar és més robust a les inclemències meteorològiques Els vehicles autònoms utilitzen dos tipus de radars segons el seu rang.

Els radars de gran abast són capaços de detectar objectes fins a 200 metres.

El principal inconvenient és que la informació que generen és en 2D ja que emeten amb un diagrama sectorial més ample en horitzontal i més estret en la vertical, fet que fa que només sigui capaç de determinar la distància a la que es troben els objectes i no pas les alçades.

Actualment el cotxe autònom que està desenvolupant Google disposa de quatre sensors RADAR. Tres d'ells estan ubicats en el para-xocs davanter: un a la part frontal i els altres dos, un a cada cantonada. En el para-xocs darrer va col·locat el l'últim RADAR.

#### **1.2.5. Ultrasons**

Els sensors d'ultrasons emeten ones de so i quan aquestes impacten amb un objecte es generen els ecos, així obtenen la posició del obstacle. Aquest sensor té la finalitat de detectar els obstacles tant vianants com vehicles a curta distància.

El rol principal d'aquest sensor és detectar obstacles a curta distància ja siguin vehicles o vianants. La seva aplicació principal és l'aparcament automàtic ja que d'aquesta manera detecta on està el vehicle del davant i del darrera per tal de realitzar l'aparcament amb seguretat.

### 1.3. Nivells d'autonomia

El nivell de seguretat que proporcionarà el vehicle autònom gràcies als sistemes desenvolupats fins ara i amb els propers garantirà un grau de seguretat cada cop més elevat. A l'espera de l'arribada de l'automatització completa del vehicle cal diferenciar-ne els diferents graus d'autonomia que podem trobar. Aquests han sigut classificats per la *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) [3] en sis nivells mostrats a continuació:

- Nivell 0: el conductor s'encarrega de tota la conducció. El que correspondria amb un vehicle tradicional sense cap tipus d'ajuda.
- Nivell 1: el conductor disposa d'un sistema d'assistència avançat (ADAS) en el vehicle que ajuda al conductor amb la direcció i amb el frenat o acceleració, en cap cas pot fer servir els dos simultàniament. Un exemple podria ser el control de velocitat de creuer o els vehicles amb aparcament assistit que actuen sobre la direcció però no sobre el accelerador o fre.
- Nivell 2: el conductor disposa d'un sistema d'assistència avançat (ADAS) en el vehicle que ajuda al conductor amb la direcció i amb el frenat o acceleració simultàniament. Un exemple seria el aparcament assistit però a diferència del cas anterior realitzaria tota la maniobra completa sense interacció del conductor.
- Nivell 3: el conductor disposa d'un sistema de conducció automatitzat (ADS) que pot realitzar les tasques del conductor en unes circumstàncies específiques. El conductor ha d'estar preparat per recuperar el control en qualsevol moment. Durant la resta de la conducció el conductor humà s'encarrega d'aquesta.
- Nivell 4: el conductor disposa de ADS, aquest pot realitzar totes les tasques de maneig i monitorització de l'entorn, el conductor humà no ha de prestar atenció en aquestes tasques. El conductor humà s'encarrega del maneig del vehicle en cas de què les funcions no les pugui realitzar el vehicle per si sol degut a la pèrdua de condicions òptimes de funcionament.
- Nivell 5: el sistema ADS pot realitzar totes les tasques durant la conducció en qualsevol circumstància. Els ocupants són passatgers i no s'han d'involucrar en la conducció del vehicle.

### 1.4. Previsions del desplegament del vehicle autònom

Des de novembre del 2017 la divisió de cotxes de Google, coneguda com Waymo (filial de Alphabet) fa circular els seus vehicles autònoms sense conductor per Chandler, zona metropolitana de Phoenix.

Aquests vehicles contenen els dispositius mencionats en el punt 1.2. El 5 de desembre de 2018 s'ha iniciat un servei de taxis autònoms. Aquests taxis es troben disponibles en quatre suburbis de la ciutat de Phoenix.

El servei només està disponible per a un nombre limitat de persones, encara que els vehicles funcionen gràcies al sistema de conducció autònom, un xofer va en la posició del pilot per intervenir en el cas de què fos necessari.

Els avanços de Waymo són dels més destacats de tota la indústria ja que els seus vehicles són els que porten més quilòmetres de conducció sense conductor. El desplegament del servei de taxis s'incrementarà molt poc a poc per tal de millorar l'experiència de trajectes en els seus vehicles.

Tot sembla indicar que el desplegament del vehicle autònom es produirà als Estats Units abans que Europa, degut a la disparitat de regles entre els estats membres que impedeixen el seu desenvolupament. A Europa el problema per als fabricants és que la majoria de lleis de tràfic són derivades de la convenció de Viena de 1968, que depenen de la Comissió Econòmica de les Nacions Unides (UNECE) per a Europa. Aquesta limita l'ús de vehicles sense conductor en Europa. No obstant, la UNECE ha obert la possibilitat a què les empreses que vulguin provar vehicles autònoms puguin fer-ho demanant una excepció per proves als estats que es vulguin provar.

La majoria de fabricants d'automòbils estan desenvolupant algun tipus de vehicle autònom. Aquests volen iniciar el desplegament dels seus vehicles en les grans ciutats dels Estats Units al 2021, en el cas d'Europa no està tant clar el quan però tot apunta a què serà posterior.

El conjunt de la informació proporcionada entén per vehicle autònom un vehicle capaç de realitzar trajectes per si sol, però en aquest cas (Waymo) no es comunica amb els diferents elements que es troben en l'espai urbà com semàfors, altres vehicles o vianants. De l'entorn urbà extreu la informació i mitjançant software decideix com actuar.

L'arribada del vehicle completament autònom dependrà del temps de desplegament de la nova xarxa 5G. Durant la primera meitat del 2019 s'iniciarà la comercialització de la xarxa 5G als Estats Units i Corea del Sud. Durant la segon meitat del 2019 s'espera que la comercialització del 5G comenci a Europa i al Japó.

El 5G i el desplegament del vehicle connectat estan estretament vinculats. Quan més ràpid es produeixi el desplegament de la 5G abans arribarà el vehicle autònom a les nostres vides. Probablement d'aquí 10 anys la xarxa 5G ja estarà lo suficient desplegada com per a que el vehicle completament autònom sigui una realitat.

## 2. REQUERIMENTS DE LATÈNCIA DEL VEHICLE AUTÒNOM

En aquest capítol ens centrarem en l'anàlisi de la latència en les comunicacions per al vehicle autònom. Entenem per latència el retard que es produeix entre elements que es comuniquen (vehicles o infraestructura), considerant el retard generat des l'instant que l'emissor té un paquet IP disponible per transmetre fins que el receptor té el mateix paquet IP disponible en la seva capa IP.

Segons el 3GPP (Third Generation Partnership Project) per comunicacions que requereixen de *Ultra-Reliable Low Latency Communications* (URLLC) com el vehicle autònom és necessari un retard d'un mil·lisegon i una fiabilitat en la transmissió de les dades molt elevada, amb una *Block Error Rate* (BLER) de  $10^{-5}$ . En el punt que ens trobem veurem els diferents tipus de comunicació, escenaris de comunicació i requeriments de latència per diferents situacions i aplicacions.

### 2.1. Tipus de comunicació segons el servei

En els diferents tipus de comunicació *Vehicle to Everything* (V2X) la latència en la comunicació és el paràmetre més important ja que la seguretat disminueix a mesura que augmenta el retard. Cal considerar que en la majoria de serveis d'aquests tipus de comunicació requereix una quantitat de dades menor que en altres comunicacions.

Una molt baixa latència en la comunicació és necessària per garantir la seguretat en tot moment ja que dades com els posicionaments dels vehicles variaran contínuament. Els tipus de comunicacions V2X es poden classificar en tres grups de serveis segons les seves prestacions:

- Serveis relacionats amb la seguretat: conjunt de serveis vinculats a la transmissió en temps real de missatges d'advertència com per exemple un missatge de frenat brusc. En aquest tipus de servei el retard i fiabilitat de las comunicacions són prioritàries per garantir la seguretat.
- Serveis no relacionats amb la seguretat: conjunt de serveis que no estan relacionats amb la seguretat del vehicle. En aquest grup trobem diferents tipus de serveis tant per el vehicle com per el passatger. Intenten optimitzar el tràfic en carretera amb l'objectiu de reduir el temps de desplaçament.

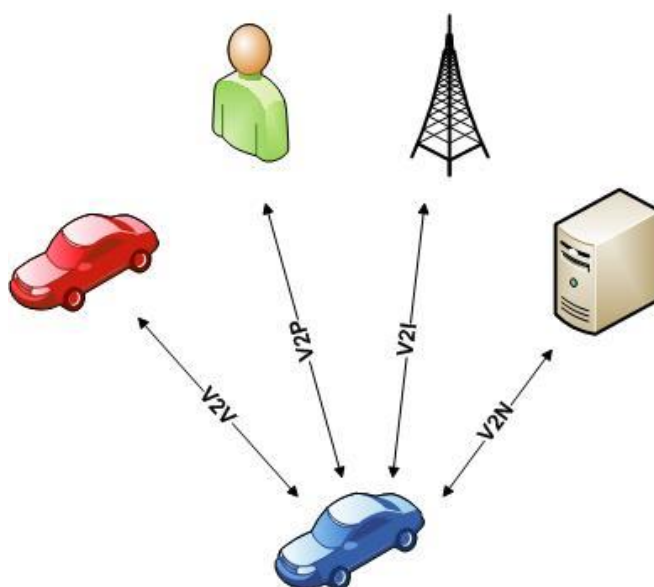
Alhora ofereixen una experiència de conducció més còmode i permeten gaudir de diferent tipus d'entreteniment multimèdia. Cal destacar que en aquests serveis els requeriments de latència no són estrictes com en els altres dos tipus de serveis.

- Serveis relacionats amb la conducció autònoma: aquests tipus té els requeriments més restrictius en termes de latència degut a la multitud de escenaris que un vehicle es pot trobar. Serveis com el *Vehicle Platooning* requereixen d'una molt baixa latència per garantir la conducció segura.

## 2.2. Escenaris de comunicació V2X

Degut a la varietat d'escenaris en el que es pot trobar el vehicle autònom, aquest haurà de comunicar-se i compartir informació amb diferents elements de la xarxa. El conjunt d'escenaris de comunicació inclosos en V2X són els mostrats en la **figura 2.1**:

- *Vehicle to Vehicle* (V2V)
- *Vehicle to Infrastructure* (V2I)
- *Vehicle to Pedestrian* (V2P)
- *Vehicle to Network* (V2N)



**Figura 2.1** Tipus de comunicacions V2X

En aquest quatre escenaris de comunicació s'haurà de difondre la informació obtinguda del seu entorn local i compartir-la amb els vehicles per tal de que aquests siguin capaços de considerar els diferents possibles perills per les persones, indiferentment si es troben en circulació o no.

## 2.3. Requeriments de latència en escenaris V2V

Cadascun del diferents escenaris de comunicació descrits en l'apartat anterior tenen diferents requeriments de latència, nosaltres ens centrarem en les comunicacions V2V perquè poden ser les més exigents. A continuació farem una descripció de les quatre categories de comunicació que propicien els diferents escenaris i mostrarem els requeriments de latència de les seves aplicacions [5].

### 2.3.1. Vehicles en comboi

Els vehicles que viatgin en una mateixa direcció que altres vehicles podran formar un comboi (platooning). El grup rebrà missatges periòdics del vehicle que liderarà el comboi. Gràcies a la informació compartida entre ells, la distància que separarà els diferents vehicles que componen el comboi serà molt reduïda. Un cop el trajecte comú d'un dels membres del comboi acabi aquest abandonarà el grup. Mitjançant la formació de vehicles en comboi es podrà estalviar el consum de benzina i prevenir accidents. En la **taula 2.1.** es mostren diferents casos de comunicació per la formació en comboi.

**Taula 2.1.** Casos vehicles en comboi

Descripció	Màxima Latència (ms)
Comunicació V2V per vehicles en comboi	10
Intercanvi d'informació externa amb membres del comboi	500
Conducció cooperativa automatitzada per separacions de curta distància	10
Intercanvi de dades captades per els sensors dels vehicles en comboi	20

La comunicació V2V per vehicles en comboi Inclou tres tipus de missatges: un per unir-se o abandonar comboi, un d'advertència i un de comunicació de grup.

- Unir-se o abandonar comboi: per formar un comboi els vehicles han d'intercanviar informació per conèixer les destinacions o rutes triades. En cas de què les dos coincideixin o almenys part d'aquestes, es triarà un vehicle líder i l'altre esdevindrà el segon vehicle del comboi. En el cas d'abandonar el comboi, un dels membres que forma el comboi haurà de comunicar la intenció d'abandonar el grup.
- Advertència: quan es forma un comboi, els vehicles que no pertanyen a ell han de conèixer l'existència del comboi. Això és necessari per tal

d'evitar la situació que un vehicle que no formi part del comboi vulgui situar-se entre membres del comboi i interrompre el seu funcionament.

- Comunicació de grup: hi ha diferents tipus de missatges per la gestió del comboi. Han d'intercanviar missatges per si han d'accelerar o frenar, sortir d'una carretera o incorporar-se a una altre. A més a més el vehicle líder consumeix més combustible per això probablement en algun moment el líder pot sol·licitar un canvi de vehicle líder del comboi.

Per evitar possibles amenaces de seguretat aquesta informació haurà de ser xifrada i el rang de les comunicacions haurà d'anar des del primer vehicle fins l'últim.

Intercanvi d'informació externa amb membres del comboi: quan els vehicles es trobin en ruta i formant un comboi el creador del comboi serà el responsable de la gestió del mateix. Aquest haurà d'actualitzar en temps real les dades de transit que informen els membres del comboi. Al mateix temps rebrà la informació de missatges de RSUs (Road Site Unit) que inclouran informació del transit llunya al comboi. Tots els membres del comboi rebran la informació ja sigui via V2V o V2I.

Conducció cooperativa automatitzada per separacions de curta distància: permet que un grup de vehicles es comuniquin automàticament amb poca separació entre ells. Els canvis de carril i els avançaments es realitzin de forma segura. Afavoreix una millor gestió de les carreteres i un alleugeriment de la congestió.

Intercanvi de dades captades per els sensors dels vehicles en comboi: degut a què els vehicles en comboi voldran estar lo menys separats possibles per tal d'estalviar combustible hauran de compartir les dades d'alta precisió captades per els sensors entre els vehicles de la mateixa àrea. Així els vehicles tindran una millor percepció del entorn.

### 2.3.2. Conducció avançada

Permetrà una conducció automatitzada tant parcial com total. Cadascun dels vehicles i RSUs compartiran la informació captada per els seus sensors amb els vehicles pròxims per tal de poder coordinar les trajectòries i maniobres. En la **taula 2.2** es mostren diferents casos de conducció avançada. Gràcies a la conducció avançada els trajectes seran més segurs i es previndran accidents.

**Taula 2.2.** Casos de conducció avançada

Descripció	Màxima Latència (ms)
<i>Cooperative Collision Avoidance</i>	10

Intercanvi de informació per vehicles llunyans	100
Alineament de trajectòria d'emergència	3
Canvi de carril cooperatiu	10

*Cooperative Collision Avoidance*: té com a objectiu avaluar la probabilitat de patir un accident i coordinar les maniobres mitjançant les dades captades per els sensors, les comandes d'acceleració i frenada, el control longitudinal i lateral s'intercanvien entre els vehicles per coordinar-se.

Intercanvi de informació per vehicles llunyans: s'aplica en comunicacions entre vehicles en zones interurbanes separats més de 200m. Per tal de conèixer la situació futura de la carretera i avaluar el nivell de futura congestió per tal d'evitar-la si es possible.

Alineament de trajectòria d'emergència: és una comunicació complementària de la *Cooperative Collision Avoidance*. Quan un vehicle capta en els sensors un obstacle en la carretera com un animal o una pèrdua de mercaderies, el vehicle informa a la resta de vehicles sobre la situació. Els vehicles en proximitat a l'obstacle comencen alinear les seves trajectòries per tal de garantir la seguretat tant dels altres vehicles com l'obstacle.

Canvi de carril cooperatiu: permet la comunicació entre vehicles que han de canviar de carril. Per realitzar-lo de forma segura és necessari intercanviar les trajectòries i les seves posicions. El canvi de carril implica coordinar els controls laterals de direcció i longitudinals d'acceleració de desacceleració per garantir una maniobra suau i segura.

### 2.3.3. Extended sensors

Permetrà el intercanvi de dades recopilades per els diferents sensors locals tant dels vehicles com RSUs, dispositius de vianants o servidors. Diferents casos de *Extended Sensors* i els seus valors de latència és mostren en la **taula 2.3**. Gràcies al intercanvi d'aquestes dades es millorarà la percepció del entorn local.

**Taula 2.3.** Casos de Extended sensors

Cas	Descripció	Màxima Latència(ms)
1	Intercanvi de mapes d'estat	10
2	Percepció col·lectiva del entorn	3
3	Compartició de dades de vídeo per a la conducció	10



Intercanvi de mapes d'estats: els diferents vehicles comparteixen en els seus missatges d'informació comuna com el posicionament i la trajectòria planificada. Els vehicles a partir del mapa d'estat rebut prenen decisions en funció de les seves dades i les difonen a la resta de vehicles perquè considerin el seu mapa d'estat actualitzat

Percepció col·lectiva del entorn: els vehicles poden intercanviar informació en temps real basada en informació captada per els sensors del vehicles. Aquest intercanvi aporta una percepció col·lectiva del entorn que pot evitar accidents. Al compartir la informació dels diferents sensors permet contrastar informacions. Es podria donar la situació de que algun dels sensors del vehicle estigui limitat per àrees que no són visibles per al sensors locals com una corba o obstacles darrera d'una cantonada.

Compartició de dades de vídeo per a la conducció: en algunes situacions l'abast visual del conductor es troba obstruït per grans vehicles com autobusos o camions. Les dades de vídeo enviades d'un vehicle a l'altre poden aportar una millora de seguretat en la presa de decisions. Tot i això cal tenir en compte que compartir dades pre-processades on els obstacles són extrets per una detecció automàtica d'objectes no és suficient perquè la decisió de conductors sobre una maniobra esta subjecta a la seva capacitat de conducció.

#### **2.3.4. Conducció remota**

Un controlador remot o una aplicació V2X obtindran el control del vehicle per als conductor que no puguin conduir per si mateixos. En casos de rutes preestablertes com les del transport públic es podrà utilitzar la conducció basada en la computació en el núvol.

La aplicació de suport de teleoperador es necessària encara que la seguretat del trànsit i la conducció sense accidents és el principal objectiu del vehicle autònom.

Aquesta opció de control remot permet que per un curt període de temps reiniciar el vehicle i prendre el control sobre ell per desplaçar-lo a una lloc segur en cas d'averia o accident. Així es reduiria el temps d'actuació i l'afectació del transit en carretera serà menor. La latència màxima seria de 20 ms ja que es contempla per desplaçaments curts i a baixa velocitat.

### **2.4. Latència entre vehicles segons la velocitat**

A continuació es presenta la demostració dels valors de latència per a un dels casos més restrictius vist en el punt anterior. L'alineament de trajectòria d'emergència presenta una latència màxima de 3 ms.

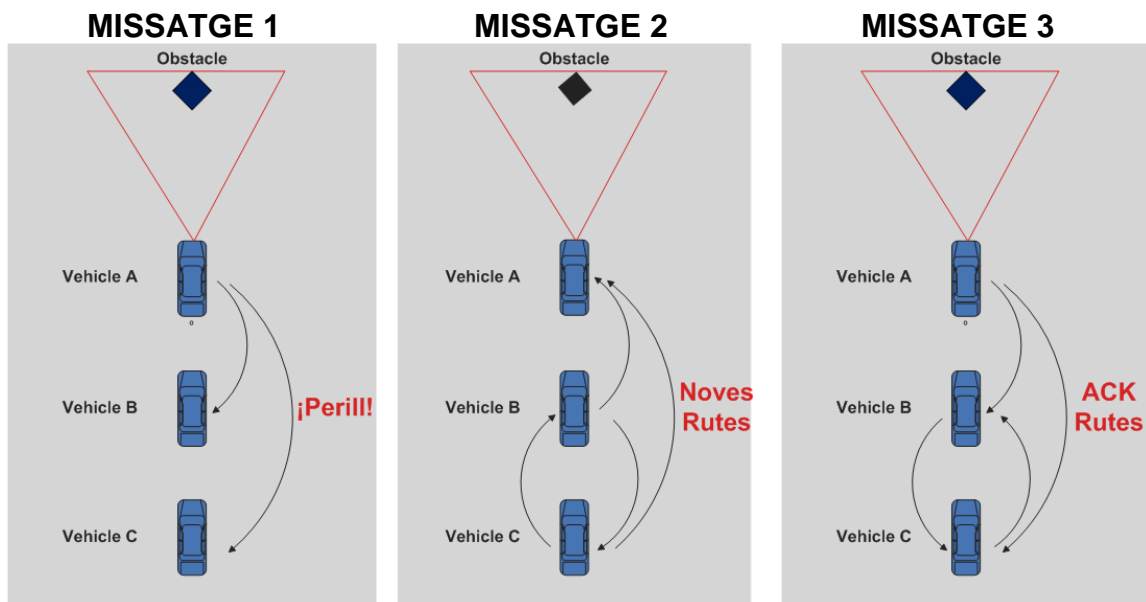
En les altres situacions el requeriment de latència és menor per tant si es pot garantir el requeriment més estricte la resta de casos s'assoliran sense problemes.

Els missatges d'alineament de trajectòria d'emergència complementen la conducció cooperativa. Aquests missatges només es produeixen en front de situacions perilloses per tal d'augmentar la seguretat del tràfic en ruta. Analitzarem la trobada d'un obstacle imprevist a la carretera.

Un cop els sensors del vehicle capten un obstacle en la carretera, el vehicle calcula la maniobra a seguir per tal d'esquivar l'obstacle i evitar posar en perill els demés vehicles que es trobin en ruta. El vehicle detector de l'obstacle informa als altres vehicles de la situació d'emergència.

Els vehicles en proximitat calculen les seves possibles trajectòries i les comparteixen amb els altres vehicles que es troben davant de la mateixa situació. Un cop rebuda la informació de tots els vehicles mitjançant un algoritme seleccionen la trajectòria i l'envien als demés vehicles.

A continuació s'envien un missatge de confirmació de les trajectòries comunes seleccionades. Aquest procés es repeteix regularment fins que cadascun dels vehicles supera el obstacle. En la **figura 2.2** podem apreciar la seqüència dels missatges descrits:

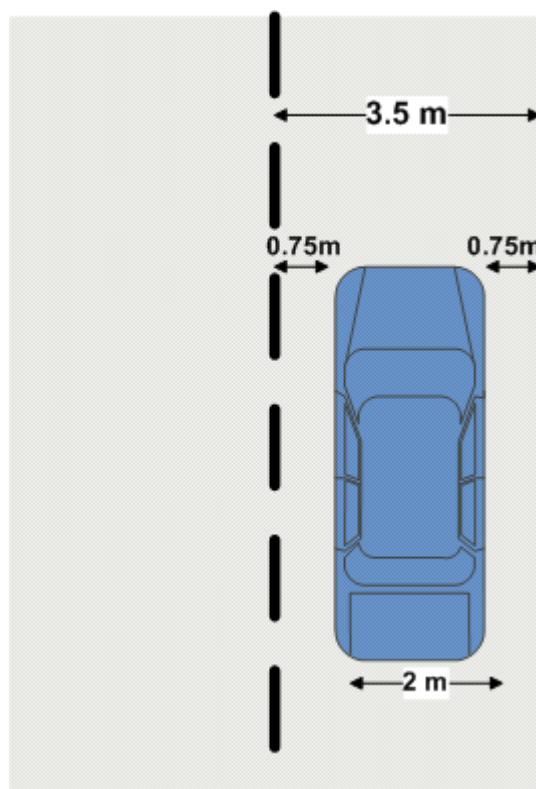


**Figura 2.2** Intercanvi de missatges

El primer esdeveniment que es produirà serà la detecció del obstacle mitjançant el sensor del vehicle que el captarà amb una resolució com a mínim

de 0,3 m en cada dimensió. Aquesta resolució és assumible tant per el RADAR com el LiDAR.

Aquest valor s'obté a partir de la consideració de l'espai restant que ocupa el vehicle en el carril. L'amplada mitja d'un carril és de 3,5 m, tenint en compte l'amplada mitja d'un vehicle que és de 2 m i que el vehicle es troba en el centre del carril, l'espai que queda per cada costat correspon a 0,75 m com podem veure a la **figura 2.3**.



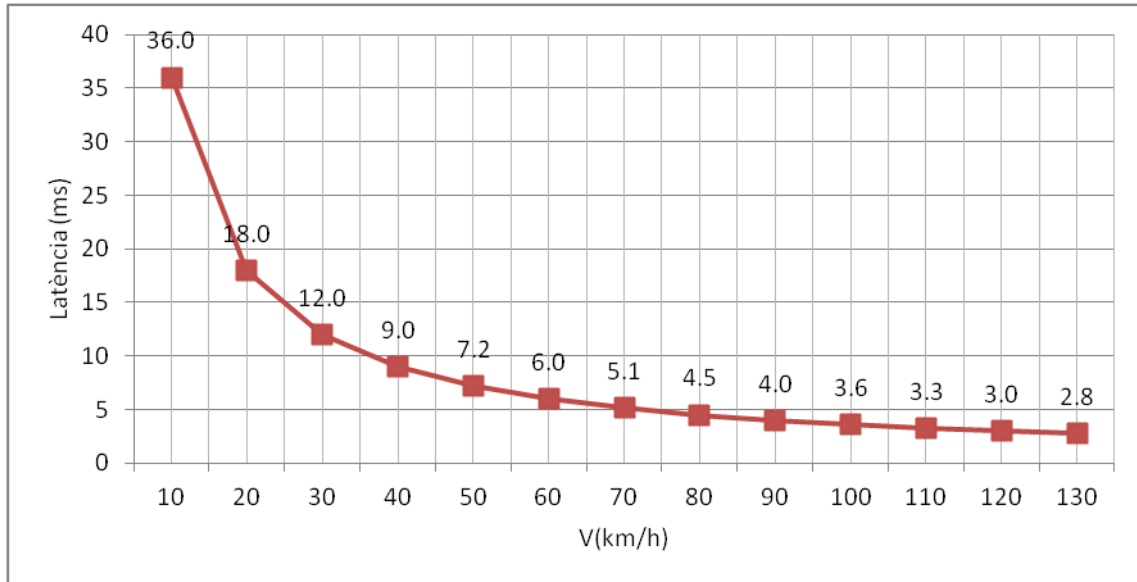
**Figura 2.3** Distàncies entre vehicle i carril

Permeten un error de mig marge d'un costat del vehicle, 0,375 m és l'error màxim teòric. Finalment degut a possibles errors i variacions de l'amplada de la carretera l'error que tindrem en compte serà de 0,3 m.

Si dividíssim la carretera en una graella de 0,3 m x 0,3 m i consideréssim que la velocitat del vehicle fos de 110 km/h (30m/s) passariem cada 10 ms per una casella de la graella, així que cada 10 ms haurem d'obtenir la nova informació de l'entorn.

Com s'ha explicat anteriorment el número mínim de missatges a intercanviar entre vehicles és de tres missatges, on s'inclou el reconeixement de l'obstacle, el càlcul de les noves rutes i la seves confirmacions. De manera que cada 3,3 ms la comunicació E2E (*End to End*) s'hauria d'haver acabat.

El valor màxim que pot permetre aquest tipus de comunicació depèn de la velocitat que circulin els vehicles, quant més elevada sigui, el valor de latència en la comunicació E2E serà més estricte tal i com podem veure en la **figura 2.4**.



**Figura 2.4** Relació entre velocitat i latència

D'aquesta manera assolim una latència màxima de 3 ms, a qualsevol velocitat de circulació permesa en Espanya la comunicació necessària per l'alineament de trajectòria d'emergència esdevindria satisfactòria.

## 2.5. Altres situacions de requeriments de latència

No només en la indústria del transport les comunicacions de molt baixa latència aportaran avenços per a la societat. En diferents àmbits com la indústria, la medicina o l'entreteniment també es veuran plenament beneficiades de l'arribada del 5G.

En les fàbriques els operaris estaran assistits per ulleres de realitat augmentada amb les que rebran instruccions i informació. D'aquesta manera el operari podrà resoldre diferents situacions amb les accions a realitzar a partir de les instruccions que rebí a través de les ulleres.

En la medicina les intervencions mèdiques podran realitzar-se de forma remota mitjançant l'ús d'un robot quirúrgic. Permetrà que els cirurgians més especialitzats atenguin als pacients més adients sense la seva presència física.

En la indústria de l'entreteniment la realitat virtual o la realitat augmentada oferiran una immersió completa als jugadors tant en mons virtuals o reals en els

quals podran interaccionar amb ells. En aquests entorns les comunicacions de molt baixa latència tenen una gran importància ja que l'ull humà necessita percebre els moviments suaument amb una baixa latència de moviment dels fotons MTP (Motion To Photon).

El temps que passa entre la rotació del punt de visió i els nous píxels degut a la variació del camp de visió ha de ser molt baix ja que valors elevats de MTP poden provocar marejos. Existeix un ampli consens entre la comunitat que estableix com a menys de 15-20 ms de latència per tal d'evitar els problemes de MTP [6].

Per demostrar que l'ordre de magnitud necessari és de la desena de mil·lisegons es considerarà el cas en deixar caure una pilota de 10 cm a una alçada de 2 metres i tornar-la a agafar quan es troba en 1 metre d'alçada del terra.

Segons l'estudi [7] l'amplada de la mà és considerada de 8 cm ja que és un valor mitja tant per homes com per dones i per tal de que la pilota no llisqui alhora d'agafar-la es considerarà necessària un 75% del contacte de la mà. L'equació utilitzada per la caiguda lliure de la pilota es la següent:

$$Y_f = Y_0 + V_0 + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \quad (2.5)$$

Punt superior de contacte amb la ma a l'alçada 1 metre  $\rightarrow 1 + \frac{0,75 \cdot 0,08}{2} = 1.03 \text{ m}$

$$1.03 = 2 + 0 + \frac{1}{2} \cdot (-9.81) \cdot t^2 \rightarrow t_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot (1.03 - 2)}{-9.81}} = 0.44 \text{ s}$$

Punt inferior de contacte amb la ma a l'alçada 1 metre  $\rightarrow 1 - \frac{0,75 \cdot 0,08}{2} = 0.97 \text{ m}$

$$0.97 = 2 + 0 + \frac{1}{2} \cdot (-9.81) \cdot t^2 \rightarrow t_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot (0.97 - 2)}{-9.81}} = 0.45 \text{ s}$$

Gràcies a la diferència de temps al passar la pilota per el punt superior de contacte i el punt inferior de contacte podem extreure el següent valor:

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (2.6)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = 0.45 - 0.44 = 0.01 \text{ s} \rightarrow 10 \text{ ms}$$

Com veurem més endavant aquest valor de baixa latència es donarà resposta gràcies a l'arribada del 5G ja que amb les generacions anteriors no són capaces de garantir d'un valor prou baix i estable.

### 3. REQUERIMENTS DE LATÈNCIA EN LES XARXES

En el tercer capítol d'aquest projecte veurem l'evolució de la latència en les diferents xarxes de comunicació. Ens centrarem en el conjunt de retards que es produeix en la xarxa LTE (Long Term Evolution) ja que és la xarxa predominant. Es desglossaran el conjunt de retards del dispositiu segons l'estat en el que es trobin o en funció de si tenen els recursos assignats.

#### 3.1. Evolució de les xarxes 1G-4G

A partir dels anys 80 les xarxes de comunicació han anat evolucionant d'una forma intensa. Aproximadament cada 10 anys ha aparegut una nova generació amb millores de velocitat, fiabilitat i latència.

En els anys 80 la xarxa de comunicació de primera generació (1G) va permetre la comunicació de veu amb una velocitat de 1,0 - 2,4 Kbps. Aquesta operava en el rang de 800-900 MHz. La qualitat de les comunicacions era baixa i no oferia cap tipus de seguretat.

La segona generació (2G) mitjançant la tecnologia GSM (Global System Mobile) va permetre la comunicació de veu i dades digitals, l'ús del SMS i també l'arribada del roaming. Es van assolir velocitats de 14 – 64 Kbps i es va utilitzar les bandes de 850-1900 MHz. La comunicació seguia utilitzant commutació de circuits així que era poc eficient. Es van desenvolupar dos nous estàndards que van ser el GPRS (General Packet Radio Service) i EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) que van millorar la velocitat fins a 115 Kbps i 384 Kbps respectivament, aquests dos nous estàndards ja van utilitzar la commutació de paquets.

En l'any 2000 la tercera generació (3G) va oferir un nou augment de la velocitat de dades encara que la comunicació de veu seguia utilitzant la commutació de circuits. La capacitat de veu i dades es van veure incrementades. Mitjançant el estàndard UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) i la tècnica d'accés CDMA (Code-Division Multiple Access) van assolir velocitats de 384 Kbps fins als 2 Mbps, aquesta tecnologia utilitzava les bandes freqüencials de 900 i 2100 MHz. Al igual que va passar amb la segona generació, durant la tercera van aparèixer dos nous estàndards que van ser el HSPA (High-Speed Packet Access) i la seva evolució HSPA+. En l'última versió es van aconseguir velocitats de pic de 168 Mbps de baixada i 22 Mbps de pujada. Amb aquestes prestacions es van assolir nous serveis com la navegació per Internet, serveis multimèdia i comunicació via xats, entre moltes d'altres aplicacions.

La quarta generació (4G) predominant avui en dia va arribar el 2010. Està basada en l'estàndard LTE. Mitjançant les noves tècniques de multiplexació i accés com el OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) o el MC-CDMA (Multi-Carrier Code-Division Multiple Access) les velocitats assolides van des de els 100Mbps fins 1Gbps. El LTE opera en les bandes de 800, 1800 i 2600 MHz.

Amb aquestes noves prestacions s'han pogut donar serveis com telefonia IP, videoconferències, TV mòbil d'alta definició i computació en el núvol.

Al llarg d'aquestes diferents generacions el valor de latència ha evolucionat. A la **taula 3.1.** que presentem a continuació s'indica el rang de valors de latència de cadascuna de les diferents generacions.

**Taula 3.1.** Latència segons generació

Generació	Latència (ms)
2G	300-1000
3G	100-500
4G	50-100
5G	1-10

La futura 5G ha estat dissenyada per contemplar tres casos d'us en funció del tipus de comunicació, aquests casos són: *enhanced Mobile Broadband* (eMBB), *massive Internet of things* (mIoT) i *Ultra-Reliable Low Latency Communications* (URLLC).

URLLC és el cas d'us on la comunicació de molt baixa latència i alta fiabilitat tant per usuaris com dispositius esdevé clau. Els casos d'us són comunicacions entre vehicles, cirurgia remota, aplicacions industrials i realitat augmentada entre d'altres.

Per la nova generació 5G els requeriments de latència del pla d'usuari per aplicacions URLLC segons el 3GPP per aplicacions és d'un mil·lisegon. Per l'establiment del pla de control són de 20 ms, temps necessari per l'establiment de la comunicació. En els punts posteriors definirem aquests valors de latència i veurem els valors actuals per la 4G.

### 3.2. Retards en la comunicació LTE

La xarxa LTE és l'actual predominant en la societat així que en aquest punt tractarem sobre el retard en les comunicacions entre dispositius LTE [10].

Un dispositiu LTE es pot trobar en 2 diferents modes en funció de si té *Radio Resource Control* (RRC) assignat o no, aquests dos modes són el IDLE i el Connectat. Aquests modes els trobem representats en la **figura 3.1.** La capa RRC és la capa que s'encarrega del control de l'enllaç radio.

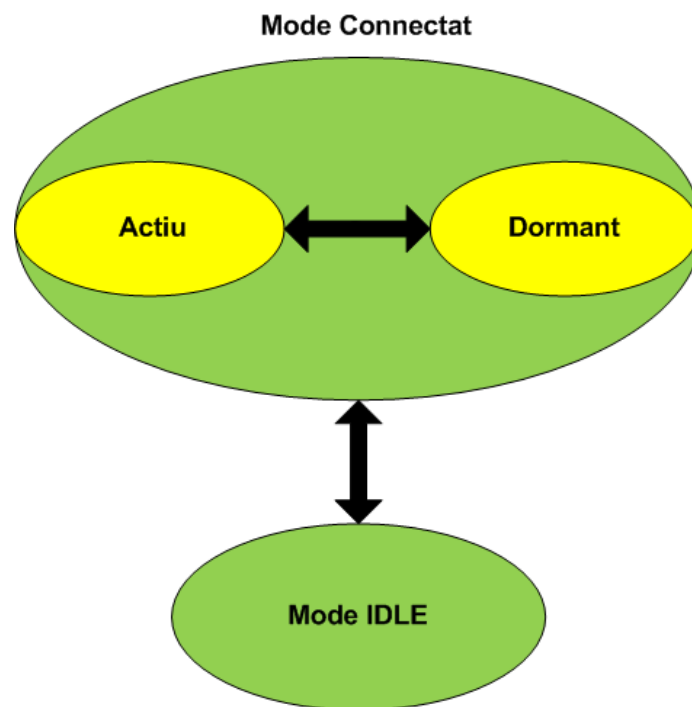
Quan un dispositiu té el RRC en mode IDLE el dispositiu només escolta el tràfic de control i no pot transmetre o rebre dades. El dispositiu realitza funcions com la monitorització del canal de *paging* per detectar les trucades entrants, adquirir informació del sistema, realitzar mesures de cel·les veïnes i reelecció de cella.

En aquest mode no hi ha establiment de connexió entre el UE (User Equipment) i el eNB (evolved Node B) ja que és un estat en el que el dispositiu es troba semi-suspès, això implica un menor consum de potència i per tant afavoreix una major duració de la bateria.

En canvi quan un dispositiu té el RRC en mode connectat pot realitzar mesures de qualitat en la cella en la que es troba i compartir-la amb el eNB o pot sol·licitar recursos al *scheduler* (Annex 8) per tal de realitzar transmissions.

Amb el mode d'alt consum de potència, el dispositiu pot transmetre o rebre dades ja que disposa del RRC assignat. Dins d'aquest mode trobem un segon estat de funcionament que permet una millor gestió de la bateria.

Aquest estat és el *Dormant*, quan un UE té establida una connexió RRC té la capacitat d'entrar en períodes de *Discontinuous Reception* (DRX) per tal d'estalviar potència en cas d'inactivitat, aquest mode de funcionament s'arriba a partir de l'estat actiu un cop que la transmissió o recepció s'ha acabat.

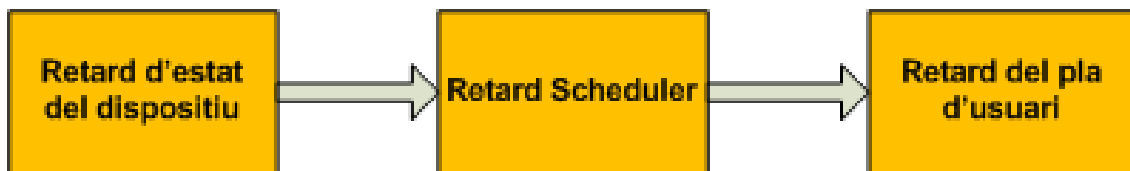


**Figura 3.1** Pla de control LTE

La latència de transició de la seva primera versió entre el mode IDLE i el mode Connectat és de 100 ms, excloent el retard introduït per el *paging* en el DL. La latència de transició entre el mode inactiu i l'actiu que és de 50 ms excloent-ne els intervals de DRX.



El retard que es produeix en la comunicació depèn de diversos factors. El primer factor és l'estat en el que es troba el dispositiu (Actiu, Dormant o IDLE) i si manté la sincronització amb la eNB. El segon factor depèn de si el dispositiu té els recursos assignats per realitzar la transmissió o recepció de la informació (Scheduler). L'últim retard és el de la transmissió i recepció de la informació també coneguda com latència del pla d'usuari. Aquests tres retards mencionats es mostren en la **figura 3.2**.



**Figura 3.2** Principals retards en la comunicació LTE

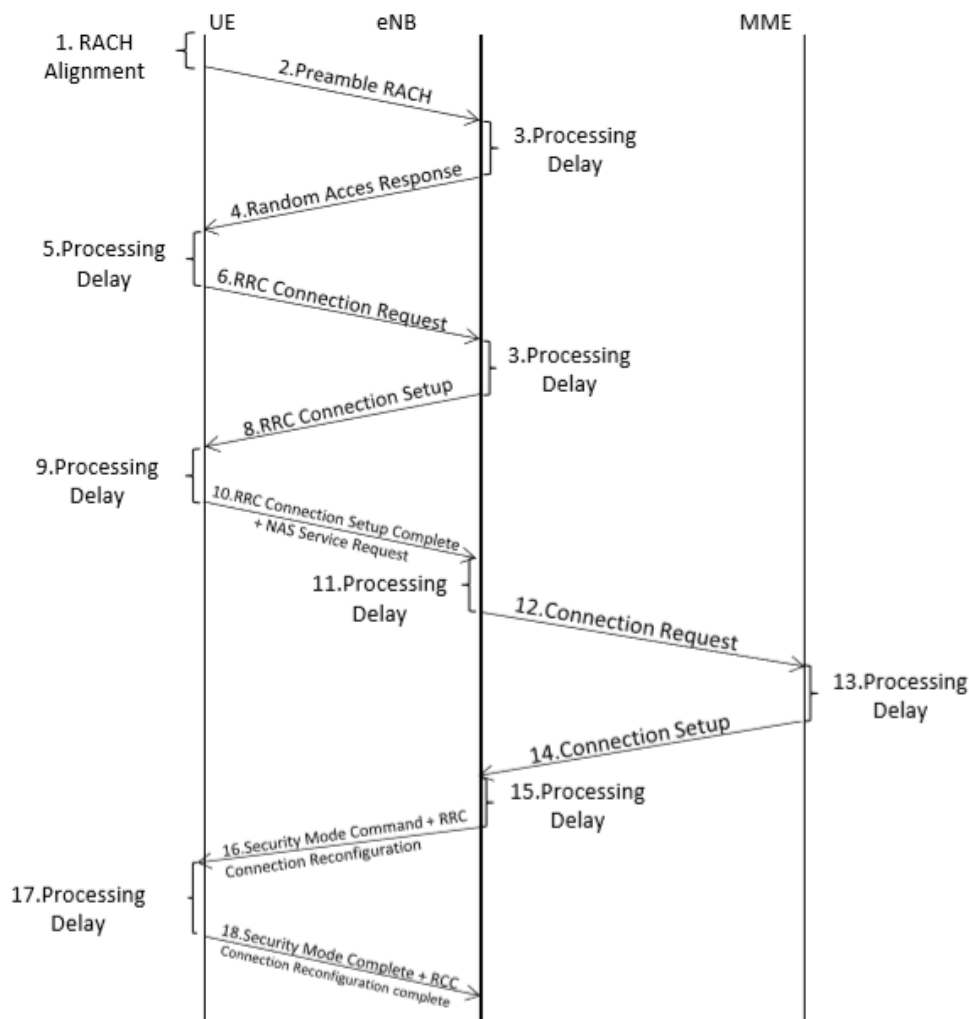
En la següent expressió s'indiquen els retards considerant que aquests retards es produeixen en els dos dispositius que volen realitzar la comunicació.

$$Retard = R_{Estat-D1} + R_{Scheduler-D1} + R_{Scheduler-D2} + R_{Estat-D2} + R_{Pla-U} \quad (3.2)$$

On  $R_{Estat-D1}$  i  $R_{Estat-D2}$  corresponen als retards deguts d'establiment del pla de control dels dos dispositius involucrats.  $R_{Scheduler-D1}$  i  $R_{Scheduler-D2}$  corresponen al retards d'assignació de recursos per als dos dispositius.  $R_{Pla-U}$  inclou el retard corresponent de les transmissions en direcció UL i DL.

### 3.2.1. Retard del pla de control de IDLE a ACTIVE

Entenem per latència del pla de control el temps de transició del UE quan es troba en el mode IDLE per tal de transitar al mode Connectat. Per realitzar aquesta transició ha de produir-se el següent procediment d'activació del pla de control. El conjunt de missatges intercanviats entre el UE, eNB i MME són els descrits en la **figura 3.3**.



**Figura 3.3** Establiment del pla de control

En la **taula 3.2.** es mostra el retard introduït per cadascuns dels missatges el qual permeten la transició de mode IDLE a Connectat els quals permeten l'establiment del pla de control. En el anàlisi no s'han tingut en compte els punts 12 i 14 de la figura 3.3 ja que estan exclosos tal i com esta formulat el requisit de latència per LTE. Alhora s'han considerat els millors casos que proporcionen retards mínims. Es presenta una columna corresponent a FDD (Frequency Division Duplex) i una a TDD (Time Division Duplex). Per TDD es contemplen els valors de dos casos: cas 1 amb l'ús de preàmbul en subtrama #2 o #7 i el cas 2 amb ús de preàmbul en subtrama #3 o #8.

**Taula 3.2.** Retards en el pla de control

Pas	Descripció	FDD (ms)	TDD (ms)	
			Cas1*	Cas2*

1	Retard degut al període de <i>Scheduling</i> del RACH	0,5	2	0,5
2	Transmissió del preàmbul RACH	1	1	1
3-4	Detecció del preàmbul i transmissió de la resposta (RAR) + alineament DL	3	3	3
5	Processat en UE + alineament DL	5	6	5
6	Transmissió del missatge <i>RRC Connection Request</i>	1	1	1
7	Processat en eNB + alineament DL	4	6	6
8	Transmissió de missatge <i>RRC Connection Setup</i>	1	1	1
9	Processat en UE + alineament UL	15	17	17
10	Transmissió de missatge <i>RRC Connection Setup Complete</i>	1	1	1
11	Processat en UE + alineament DL	4	4	4
13	Processat en MME	15	15	15
15	Processat en eNB + alineament DL	4	4	4
16	Transmissió de missatge <i>RRC Security Mode Command</i> y <i>Connection Reconfiguration</i>	1,5	2,1	2,1
17	Processament en UE	20	20	20
Retard total( IDLE→ACTIU)		76	83,1	80,6

\*Cas 1: Preàmbul en subtrama #2 o #7 (probabilitat = 0,8)

\*Cas 2: Preàmbul en subtrama #3 o #8 (probabilitat = 0,2)

En la **taula 3.2.** s'han inclòs els retards d'alineament tant en el UL com en el DL propis del mode TDD, que fan referència a que en aquest mode no en totes les subtrames es poden realitzar transmissions en UL o en DL, ja que és necessari esperar un temps fins a disposar de una subtrama amb la configuració adequada, per tant és necessari espera un temps d'alineament.

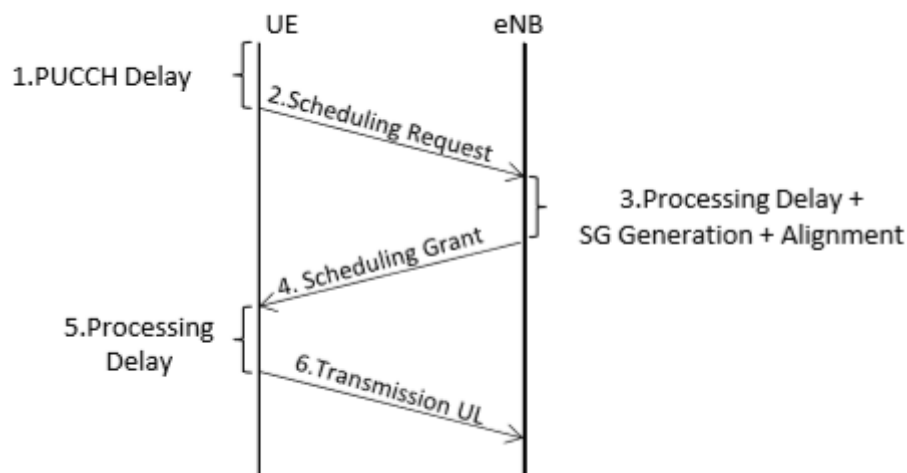
Assumint una estructura de trama FDD la transició entre el mode IDLE al mode Connectat es pot aconseguir en 76 ms considerant un cicle de *Physical Random Access Channel* (PRACH) de 1 ms i finestres de transmissió de *Random Access Response* (RAR) de 3 ms.

En el cas d'assumir una estructura de trama TDD la transició del mode IDLE al mode Connectat s'aconsegueix un retard del ordre dels 82 ms que pot variar lleugerament en funció de la finestra de transmissió a considerar de RAR ja sigui de 3 o 5 ms.

### 3.2.2. Retard de transició de Dormant a Actiu

En l'estat *Dormant* el UE té establerta una connexió *Radio Resource Control* (RRC) però pot entrar en períodes DRX per tal d'estalviar potència en cas d'inactivitat del dispositiu. Durant aquest temps el UE pot haver perdut la sincronització. A continuació mostrarem els retards introduïts en funció de si la transició es iniciada en el UL o DL i si el UE està sincronitzat o no.

- Transició iniciada en UL amb UE sincronitzat: en la **figura 3.4** es mostra el conjunt de missatges intercanviats entre el UE i la eNB. Per calcular el temps de transició s'ha considerat una transmissió sense errors de dades, senyalització i no es considera el cicle DRX.



**Figura 3.4** Transició UL amb UE sincronització

En les **taula 3.3.** es proporciona un anàlisi del retard de transició iniciat en el UL amb UE sincronitzat.

**Taula 3.3.** Retard transició UL amb UE sincronitzat

Pas	Descripció	FDD (ms)	TDD (ms)	
			Cas1*	Cas2*

1	Retard mesurat fins la pròxima ocasió de SR amb (cicle de PUCCH de 5ms)	2,5	2,5	2,5
2	Transmissió del SR	1	1	1
3	Processament en eNB + generació de SG + alineament DL	3	3	5
4	Transmissió del SG	1	1	1
5	Processament en UE	3	5	3
6	Transmissió de dades UL + alineament UL	1	1	1
Retard total		11,5	13,5	13,5

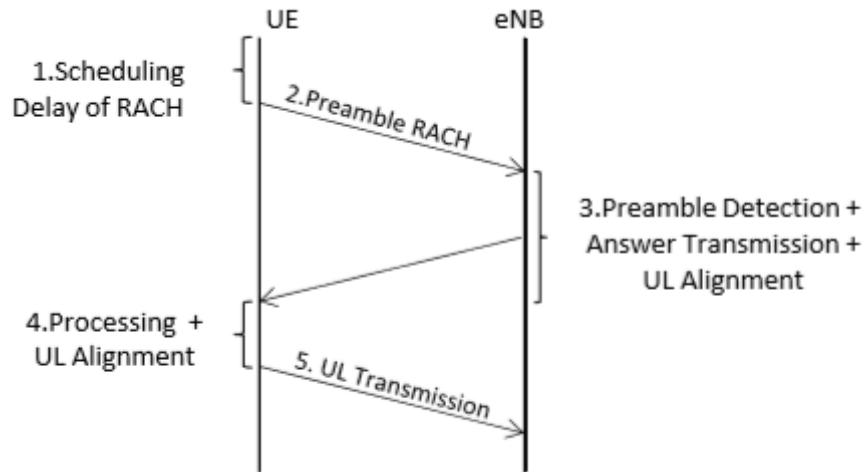
\*Cas 1 :SR en subtrama #2 o #7

\*Cas 2 :SR en subtrama #3 o #8

La transició requereix que el UE sol·liciti un *Scheduling Request* (SR) i que eNB contesti amb un missatge de *Scheduling Grant* (SG). Per l'estructura de trama TDD i FDD s'ha assumit una assignació de PUCCH (Physical Uplink Control Channel) per SR de 5 ms, obtenint així un retard de 11,5 ms per la configuració FDD.

En el cas de la configuració TDD el retard del processat depèn de la subtrama utilitzada, per aquest motiu s'han considerat 2 casos segons el tipus de subtrama, tot i que el valor del retard final ha sigut el mateix 13,5 ms.

- Transició iniciada en UL amb UE sense sincronització. En la figura 3.5 es mostren els missatges corresponents a una transició iniciada en UL amb el UE sense sincronització.



**Figura 3.5** Transició UL amb UE sense sincronització

En les **taula 3.4.** es proporciona un anàlisi del retard de transició iniciat en el UL amb UE sense sincronització.

**Taula 3.4.** Retard de transició UL amb UE sense sincronització

Pas	Descripció	FDD (ms)	TDD (ms)	
			Cas1*	Cas2*
1	Retard degut al període de SR del RACH	0,5	2	0,5
2	Preàmbul RACH	1	1	1
3	Detecció del preàmbul i transmissió de resposta + alineament DL	3	3	3
4	Processat en el UE + alineament UL	5	6	5
5	Transmissió de dades UL	1	1	1
Retard total		10,5	13	10,5

\*Cas 1 :Preàmbul en subtrama #2 o #7 (probabilitat = 0,8)

\*Cas 2 :Preàmbul en subtrama #3 o #8 (probabilitat = 0,2)

A diferència del cas anterior, és necessari l'ús del canal *Random Acces Channel* (RACH) per sol·licitar recursos. La eNB respon amb SG i una informació addicional per permetre la sincronització anomenada *Time Advance* (TA).

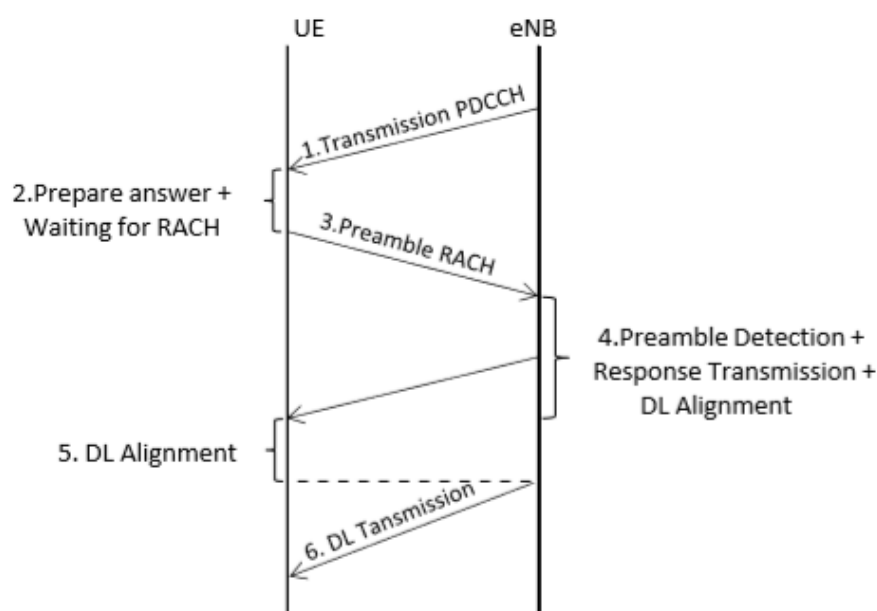
Per la configuració de trama FDD s'ha assumit una assignació del PRACH de 1 ms i una finestra de transmissió i resposta d'accés aleatori de 3 ms, obtenint així un retard e 10,5 ms per la configuració FDD.

- Transició iniciada en DL amb UE sincronitzat

Un UE amb sincronització en el DL monitoriza el PDCCH durant el temps d'activitat del cicle DRX, no introdueix cap retard addicional a la sincronització comparat amb la transició iniciada en UL per UE sincronitzat. Tal i com ja s'ha esmentat anteriorment el temps del cicle DRX no s'ha considerat en el anàlisis.

- Transició iniciada en DL amb UE sense sincronització

En la **figura 3.6** que es proporciona a continuació es mostra el conjunt de missatges necessaris per recuperar la sincronització en el DL.



**Figura 3.6** Transició DL amb UE sense sincronització

En aquest cas és necessari l'ús d'un preàmbul dedicat al UE, el retard introduït en la transició és el que es mostra en la **taula 3.5.** a continuació.

**Taula 3.5.** Retard transició DL amb UE sense sincronització

Pas	Descripció	FDD (ms)	TDD (ms)		
			Cas1*	Cas2*	Cas3*

1 FDD	UE rep el preàmbul dedicat en PDCCH, prepara la transmissió en UL i ha d'esperar 6 subtrames	6	-	-	-
2 FDD	Retard degut al període scheduling del RACH	0,5	-	-	-
1 TDD	Transmissió de PDCCH	-	0,5	0,5	1,5
2TDD	UE rep el preàmbul dedicat en PDCCH, prepara la transmissió UL i ha d'esperar al següent RACH	-	7	6	8
3	Preàmbul RACH	1	1	1	1
4	Detecció preàmbul y transmissió de resposta + alineament DL	3	3	3	3
5	Alineament temporal d'acord amb la resposta rebuda + alineament DL	2	3	3	3
6	Transmissió dades DL	1	1	1	1
Retard total		13,5	15,5	14,5	17,5

\*Cas 1 : PDCCH en subtrama #0 o #5 (probabilitat = 0,2)

\*Cas 2 : PDCCH en subtrama #1 o #6 (probabilitat = 0,2)

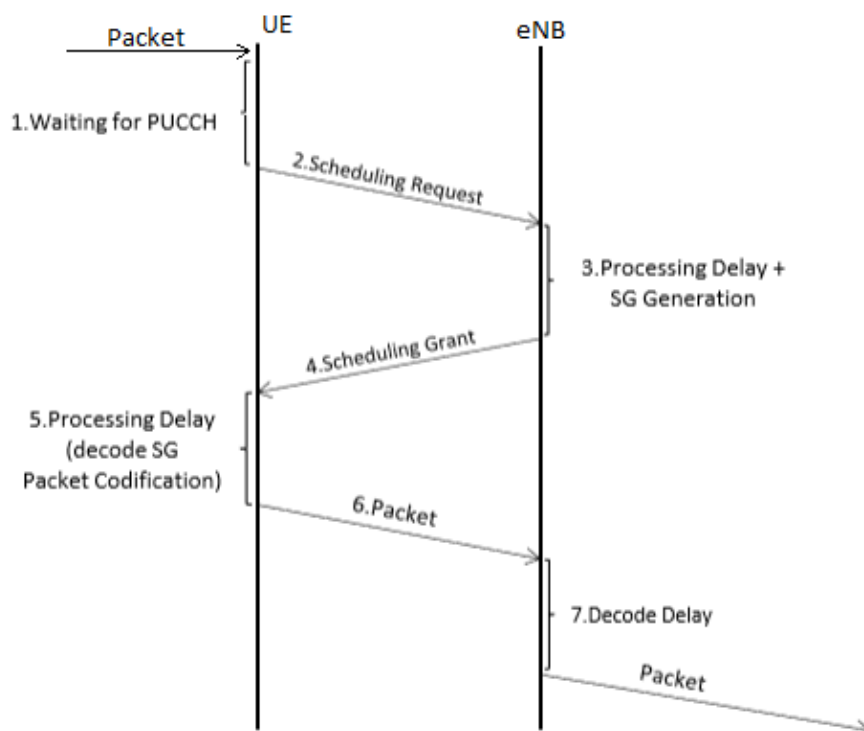
\*Cas 3 : PDCCH en subtrama #4 o #9 (probabilitat = 0,6)

### 3.2.3. Senyalització UL i DL

Considerant que el UE es troba sincronitzat amb la eNB. Un cop el UE detecta que té un paquet per enviar en el UL, ha de realitzar un *Scheduling Request* (SR) per tal que eNB li assigni recursos per poder transmetre.

Aquesta assignació de recursos no es produeix immediatament, s'aconsegueix a partir de l'intercanvi de missatges mostrat en la **figura 3.7**. Els valors de retard de cadascun dels component estan especificats per el 3GPP[11].





**Figura 3.7** Senyalització en UL

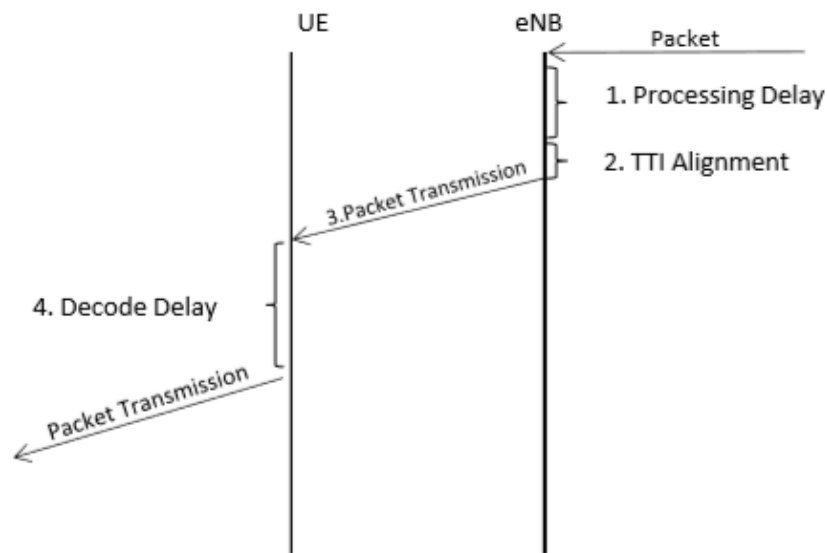
Quan el UE rep el SG s'identifica els paràmetres de transmissió, prepara les dades a transmetre i un cop està preparat transmet la informació. En la **taula 3.6.** que és mostra a continuació s'indiquen els valors de retard que aporten cadascun dels missatges.

**Taula 3.6.** Senyalització en UL

Pas	Descripció	Temps (ms)
1	Temps mitjà d'espera per PUCCH	5/0,5ms
2	UE envia la sol·licitud de <i>Scheduling Request</i>	1
3	eNB descodifica la sol·licitud de programació i genera <i>Scheduling Grant</i>	3
4	Transmissió de <i>Scheduling Grant</i>	1
5	Retard de processament de la UE (descodificació de la <i>Scheduling Grant</i> + codificació L1 de dades UL)	3

6	Transmissió de dades UL	1
7	Descodificació de dades en eNodeB	3
	Retard Total	17/12,5

Un cop que la eNB rep un paquet d'un UE dirigit a un altre UE, si el destinatari es troba en estat IDLE la eNB li envia el *paging* per tal de què sàpiga que té informació concreta per a ell. Com a conseqüència entra en el procediment per transitar al mode Connectat. El conjunt de retards per la senyalització en el DL són els mostrats en la **figura 3.8**.



**Figura 3.8** Senyalització en DL

El UE escolta el canal de control i rep la informació de com extreure els paquets de dades, realitza la descodificació dels *resource blocks (RB)* i la *Modulation Coding Scheme (MCS)* que utilitzarà per obtenir les dades. En la **taula 3.7**, s'indiquen els valors de retard que aporten cadascun dels missatges.

**Taula 3.7.** Senyalització DL

Estat	Descripció	Temps (ms)
1	Processament dades entrants	3

2	Alineació del TTI	0,5
3	Transmissió de dades DL	1
4	Descodificació dades en UE	3
	Retard Total	7,5

### 3.2.4. Retard del pla d'usuari

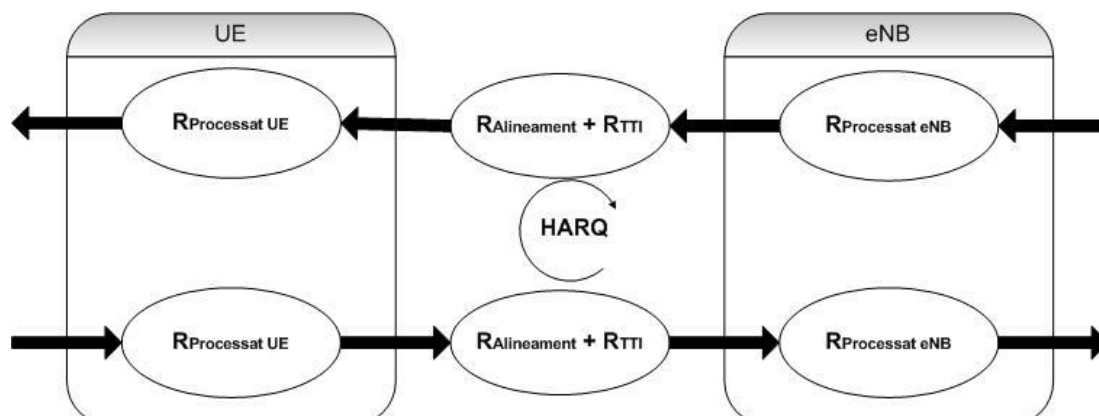
El retard introduït per el pla d'usuari inclou el temps de transmissió d'un paquet entre el UE i el eNB o entre el eNB i el UE, des del moment en què el paquet està disponible en la capa IP dels transmissor fins que es troba disponible en la capa IP del receptor.

El requisit fixat per LTE és de 5 ms en cas de baixa carrega (considerant 1 únic usuari amb flux de dades) per a paquets petits (per exemple paquets amb 0 bytes de *payload* i amb capçaleres IP). Al considerar una situació de baixa carrega per avaluar la latència del pla d'usuari els retards degut al procés de *scheduling* són insignificants.

A més a més s'assumeix que es disposa de *scheduling grant* així que no és necessari realitzar un procediment d'accés aleatori. El retard del pla d'usuari es degut als següents elements:

- Retards de processament en els diferents nodes
- Duració del TTI (Transmission Time Interval)
- Alineament de la trama
- Retard de retransmissions

Aquests elements els podem apreciar en la **figura 3.9** mostrada a continuació.



**Figura 3.9** Latència pla d'usuari

El càlcul del retard del pla d'usuari correspon a la següent expressió:

$$\begin{aligned} \text{Retard}_{\text{Pla-U}}(\text{ms}) = & R_{\text{Processat UE}} + R_{\text{Alineament}} + R_{\text{TTI}} \\ & + R_{\text{Processat eNB}} + n \cdot \text{HARQ\_RTT} \end{aligned} \quad (3.2)$$

$R_{\text{Processat UE}}$  i  $R_{\text{Processat eNB}}$  són els retards del processament,  $R_{\text{TTI}}$  és la duració del TTI temps en el qual es transmet un bloc de transport radio i  $R_{\text{Alineament}}$  és el retard d'alineament de la trama, *Hybrid ARQ* (HARQ) és el temps que es tarda en realitzar una retransmissió i  $n$  és el numero de retransmissions.

Aquesta expressió es valida tant per el UL com per el DL on típicament es produeixen 0 o 1 retransmissions HARQ, de manera que l'anterior expressió la podem aproximar de la següent manera:

$$\begin{aligned} \text{Retard}_{\text{Pla-U}}(\text{ms}) = & R_{\text{Processat UE}} + R_{\text{Alineament}} + R_{\text{TTI}} \\ & + R_{\text{Processat eNB}} + p \cdot \text{HARQ\_RTT} \end{aligned} \quad (3.3)$$

On  $p$  és la probabilitat d'error de la primera transmissió HARQ. En la taula que es mostra a continuació s'indica els retards típics de cadascun dels components i el retard total per el valor de probabilitat d'error de 0 i 0,3 en la primera transmissió amb una estructura de trama FDD.

**Taula 3.8.** Retards pla d'usuari amb configuració FDD

Component	Sense retransmissió $p = 0$	Amb retransmissió $p = 0,3$
Processat en el UE	1	
Alineament de trama	0,5	
TTI paquet de dades	1	
Retransmissió HARQ	0	0,3·5
Processat en la eNB	1	
Retard total (ms)	3,5	5

Els valors presentats són vàlids tant per el UL com el DL amb el tipus de trama FDD. En el cas de que l'estructura de trama sigui TDD, les úniques variacions

que es produeixen respecte la trama FDD són els valors mitjans del retard d'alineament de la trama i HARQ ja que són diferents en funció de la trama.

A continuació en la **taula 3.9.** es mostra els valors mitjos per a les component de retard en el UL amb la configuració TDD amb els diferents tipus de trama.

**Taula 3.9.** Retards pla d'usuari en UL amb configuració TDD

Component	Configuració UL/ DL						
	0	1	2	3	4	5	6
Processat en el UE	1						
Alineament de trama	1,7	1,1	0,7	1,1	0,8	0,6	1,4
TTI paquet de dades	1						
Processat en la eNB	1						
Retransmissió HARQ	1	1,02	0,98	1,05	1,16	1,24	1,12
Retard total (ms)	5,7	5,12	4,68	5,15	4,96	4,84	5,52

El temps de retransmissió HARQ i d'alineament de trama depenen de la configuració UL/DL. En la següent la **taula 3.10.** es mostra els valors mitja per als components del retard en el DL amb configuració TDD:

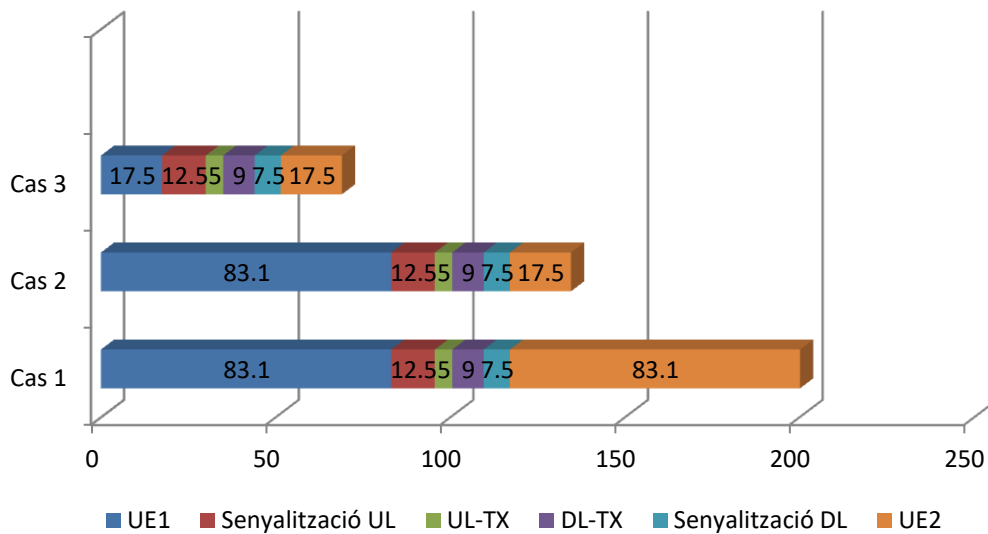
**Taula 3.10.** Retards pla d'usuari en DL amb configuració TDD

Component	Configuració UL/ DL						
	0	1	2	3	4	5	6
Processat en el UE	1						
Alineament de trama	1,1	1,7	2,5	3,3	4,1	5	1,4
TTI paquet de dades	1						
Processat en la eNB	1						
Retransmissió HARQ	1,16	1	1	1	1	1	1,15
Retard total (ms)	5,26	5,7	6,5	7,4	8,1	9	5,55

### 3.3. Anàlisis del retard segons l'estat

A continuació en la **figura 3.10** es mostra una comparació genèrica prenent els valors mencionats en els diferent apartats anterior. S'han considerat només tres casos en funció de l'estat del UE amb el tipus de retard de transmissió més elevat especificat i amb una retransmissió, els quals es mostren a continuació:

- Cas 1: els dos UE es troben en l'estat IDLE, es necessita senyalització en UL/DL i es considera una transmissió amb configuració de trama TDD de tipus 5.
- Cas 2: el primer UE es troba en l'estat IDLE, el segon UE es troba en l'estat *Dormant*, es necessita senyalització en UL/DL i la transmissió de configuració de trama TDD de tipus 5.
- Cas 3: els dos UE es troben en l'estat *Dormant*, es necessita senyalització en UL/DL i es considera una transmissió amb configuració de trama TDD de tipus 5.



**Figura 3.10** Anàlisis del retard en diferents casos

Com podem apreciar en cap dels casos ens trobaríem al voltant d'un retard en la comunicació entre dispositius de 10 ms, valor genèric per múltiples aplicacions del vehicle autònom considerades en el punt 2. Tal i com s'ha

mentonat en anteriors apartats no s'ha tingut en compte el retard que introdueix el cicle DRX per al *paging*.

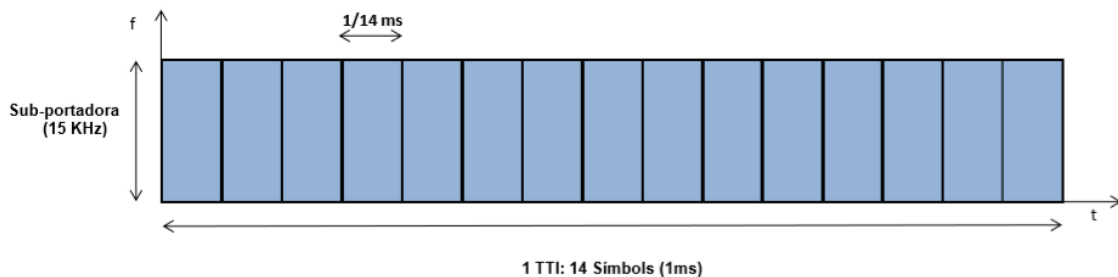
Amb l'actual LTE el retard introduït per l'establiment de la connexió RRC és massa elevat. Per tal d'acostar el valor de la latència per sota dels 50 ms la connexió RRC s'haurà de mantenir un cop establerta. En cas de què fos necessari un restabliment de la connexió el valor de la latència en la comunicació no seria vàlid.

## 4. TÈCNIQUES DE REDUCCIÓ DE LA LATÈNCIA EN LTE

En aquest capítol veurem diferents tècniques de reducció de la latència per al LTE. Partint de la base de què l'establiment de la connexió no es perdés. Aquestes tècniques ha estat aplicades a la capa física i MAC les funcions d'aquestes capes estan explicades en l'annex 7. Consisteixen en una reducció de la mida de la trama i per tant reducció de l'actual TTI, un nou esquema de retransmissió [12].

### 4.1. Nova estructura de trama

La principal millora en la capa física es produeix en la trama del LTE. L'actual trama està formada per 14 símbols amb una duració de 1 ms. El valor de la subtrama correspon al valor típic del TTI que com s'ha dit en el capítol anterior és de 1 ms. La estructura de la trama LTE és mostra en la **figura 4.1**

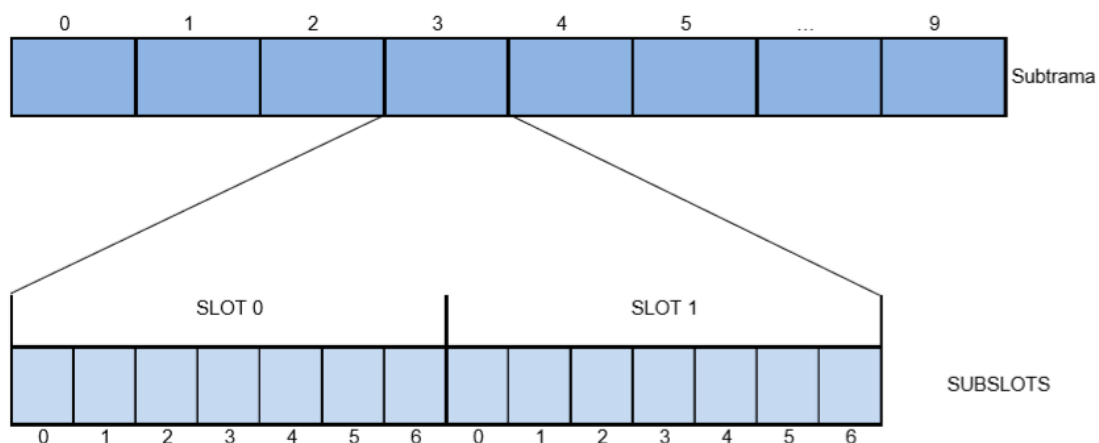


**Figura 4.1** Estructura subtrama LTE

Des de la *release* 8 fins la *release* 14 la latència del pla d'usuari no ha patit cap reducció. Amb l'arribada de la *release* 15 s'ha introduït la reducció del TTI que provoca un canvi significatiu en termes de latència.

Una de les principals complicacions de disseny per a la capa física ha estat que la nova versió pogués mantenir la compatibilitat amb les altres *releases* anteriors. Aquest requeriment ha restringit altres dissenys de la capa física. Amb la introducció d'una estructura de trama més curta dividint l'actual en 2 slots o en 6 subslots la trama queda com es mostra en la **figura 4.2**.



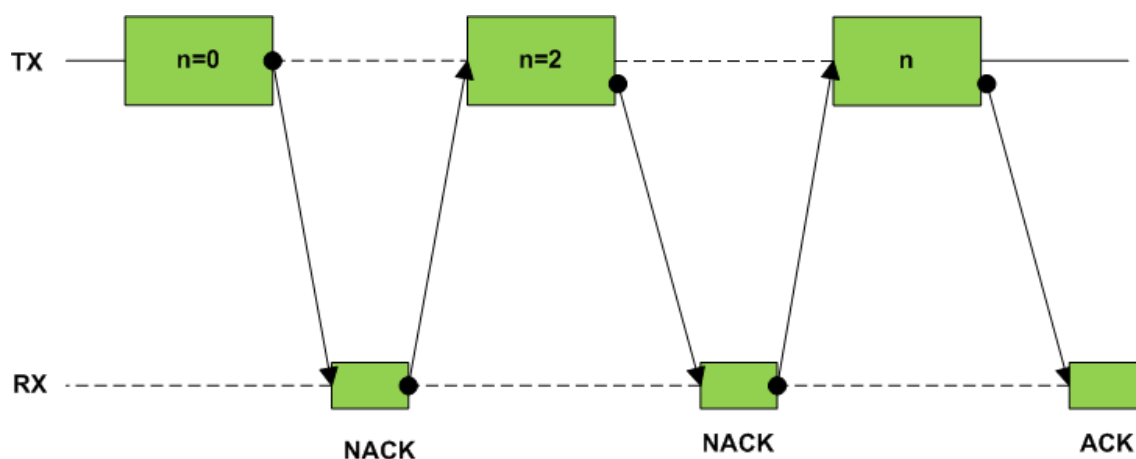


**Figura 4.2** Estructura Slot i Subslot LTE

La mida dels slots és de 0,5 ms i la mida dels subslots passa a ser de 0,17 ms. Amb aquesta reducció del TTI el temps de processament també disminueix ja que els nous slots i subslots són d'una mida menor per tant es processaran abans.

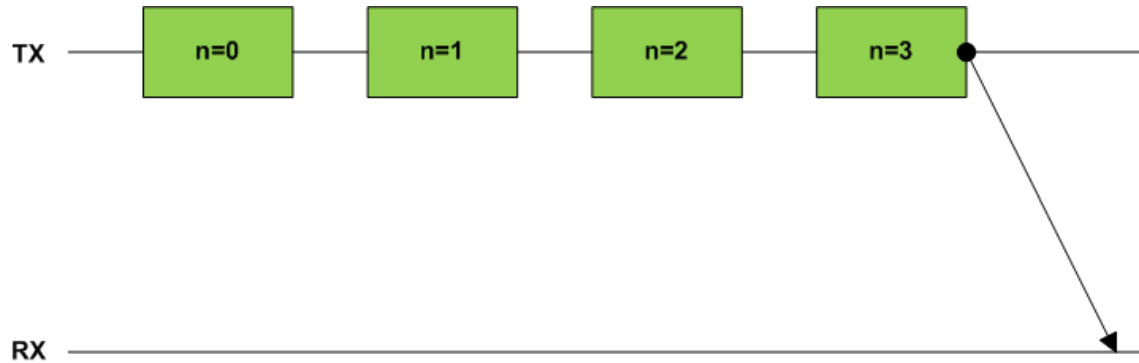
## 4.2. Esquemes de retransmissió HARQ i HARQless

Fins ara en cas de què es produís un error s'havia de realitzar una nova retransmissió que introduïa el retard HARQ. Aquest retard es produïa ja que el receptor havia de notificar a l'emissor que la transmissió havia sigut incorrecta i l'emissor havia de tornar a transmetre tal i com podem veure a la **figura 4.3**.



**Figura 4.3** Procediment HARQ

De forma alternativa s'ha proposat un nova opció de retransmissió anomenada HARQless. Consisteix en realitzar les retransmissions just després de la primera transmissió. D'aquesta manera ens estalviem haver d'esperar el *feedback* de la primera transmissió en cas de què sigui errònia tal i com podem veure en la **figura 4.4**. El número de repeticions s'ha configurat a tres.



**Figura 4.4** Procediment HARQless

### 4.3. Avaluació de la latència del pla d'usuari

A continuació es presenta l'anàlisi de la latència del pla d'usuari diferenciant el UL del DL ja que en el primer cas és necessari realitzar la petició de SR tal i com s'ha explicat en el apartat 3.2.3. També es consideraran tres retransmissions tant amb el HARQ com amb HARQless i els càlculs es realitzaran amb una estructura de trama de slot i subslot.

#### 4.3.1. Pla d'usuari DL amb Retransmissió HARQ i HARQless

Com s'ha mostrar en el apartat 3.2.4 el retard en el pla d'usuari es calcula a partir de la següent expressió 4.1. Aquesta expressió la podem formular en funció del TTI ja que cadascun dels retards correspon a 1 TTI, de manera que l'expressió queda de la següent manera:

$$\begin{aligned} \text{Retard}_{\text{Pla-U}}(\text{ms}) = & 1 \text{ TTI}(R_{\text{Processat UE}}) + 1 \text{ TTI}(R_{\text{Alineament}}) + 1 \text{ TTI}(R_{\text{TTI}}) \\ & + 1 \text{ TTI}(R_{\text{Processat eNB}}) + n \cdot \text{HARQ\_RTT} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Si tenim en compte els retards introduïts en cas de produir-se una retransmissió, podem substituir  $n \cdot \text{HARQ\_RTT}$  per  $n \cdot 8 \text{ TTI}$ . L'expressió final per el DL serà la següent:

$$\begin{aligned} \text{Retard}_{\text{DL-HARQ}}(\text{ms}) &= 1 \text{ TTI}(\text{R}_{\text{Processat UE}}) + 1 \text{ TTI}(\text{R}_{\text{Alineament}}) + 1 \text{ TTI}(\text{R}_{\text{TTI}}) \\ &+ 1 \text{ TTI}(\text{R}_{\text{Processat eNB}}) + n \cdot \text{HARQ\_RTT} = 4 \text{ TTI} + n \cdot 8 \text{ TTI} \end{aligned} \quad (4.2)$$

En la **taula 4.1.** es mostra els valors del pla de latència d'usuari en DL amb l'actual HARQ. Podem apreciar que a mesura que es necessiten retransmissions el retard en el pla d'usuari augmenta. Alhora amb l'ús d'un valor de TTI menor l'augment del retard produït per les retransmissions és considerablement menor.

**Taula 4.1.** Latència en el pla d'usuari en DL amb HARQ

	TTI = 1 ms	TTI = 0,5 ms	TTI = 0,17 ms
Transmissió Inicial	4	2	0,68
1a Retransmissió	12	6	2,04
2a Retransmissió	20	10	3,4
3a Retransmissió	28	14	4,76

Amb la utilització d'un TTI de 0,17 ms aconseguim que la transmissió inicial es trobi per sota de 1 ms.

Per el cas en què la tècnica de retransmissió utilitzada sigui HARQless aconseguim reduir el retard en les retransmissions. Mitjançant l'expressió 4.1 i substituint el seu terme  $n \cdot \text{HARQ\_RTT}$  per  $n$  que és el numero de repeticions obtenim la següent expressió:

$$\begin{aligned} \text{Retard}_{\text{DL-HARQless}}(\text{ms}) &= 1 \text{ TTI}(\text{R}_{\text{Processat UE}}) + 1 \text{ TTI}(\text{R}_{\text{Alineament}}) + 1 \text{ TTI}(\text{R}_{\text{TTI}}) \\ &+ 1 \text{ TTI}(\text{R}_{\text{Processat eNB}}) + n \cdot \text{TTI} = 4 \text{ TTI} + n \cdot \text{TTI} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Aplicant l'expressió amb diferents valors del TTI i considerant diferents números de retransmissions obtenim la següent **taula 4.2.**

**Taula 4.2.** Latència en el pla d'usuari en DL amb HARQless

	TTI = 1 ms	TTI = 0,5 ms	TTI = 0,17 ms
Transmissió Inicial	4	2	0,68
1a Retransmissió	5	2,5	0,85
2a Retransmissió	6	3	1,02
3a Retransmissió	7	3,5	1,19

Amb el procediment de HARQless aconseguim que inclús utilitzant la primera retransmissió el valor del retard es troba per sota de 1 ms. La segona i tercera transmissió es troben al voltant del mil·lisegon.

#### 4.3.2. Pla d'usuari UL amb Retransmissió HARQ i HARQless

En l'anàlisi del pla d'usuari del UL és diferent que el del DL ja que el UE necessita realitzar la petició de SR per obtenir els recursos per transmetre. A continuació en la **taula 4.3.** es mostra els retards que inclouen la petició de SR i també el retard introduït per el cas de produir-se retransmissions.

**Taula 4.3.** Retards en el pla d'usuari en UL amb HARQ

Pas	Descripció	Retard
1	Temps mitjà d'espera per PUCCH	1,5 TTI
2	UE envia la sol·licitud de <i>Scheduling Request</i>	1 TTI
3	eNB descodifica la sol·licitud de programació i genera <i>Scheduling Grant</i>	3 TTI
4	Transmissió de <i>Scheduling Grant</i>	1 TTI
5	Retard de processament de la UE (descodificació de la <i>Scheduling Grant</i> + codificació L1 de dades UL)	3 TTI
6	Transmissió de dades UL	(1+n*8) TTI
7	Descodificació de dades en eNodeB	1,5 TTI

A partir dels valors mostrats en la taula anterior podem expressar el retard del pla d'usuari amb la següent expressió:

$$\text{Retard}_{\text{UL-HARQ}}(\text{ms}) = 11 \text{ TTI} + (1 + n \cdot 8) \text{ TTI} \quad (4.4)$$

Degut a què per transmetre en el UL es necessita realitzar la petició de *Scheduling* el retard que pateix el UL és superior al que s'ha mostrat en el DL. Els valors del retard en UL amb HARQ es mostren a la següent taula.

**Taula 4.3.** Latència en el pla d'usuari en UL amb HARQ

	TTI = 1 ms	TTI = 0,5 ms	TTI = 0,17 ms
Transmissió Inicial	12	6	2,04
1a Retransmissió	20	10	3,4
2a Retransmissió	28	14	4,76
3a Retransmissió	36	18	6,12

Amb el procediment HARQless per el que fa a la transmissió inicial té els mateixos valors que el del HARQ perquè el seu mecanisme no arriba a utilitzar-se. Amb el cas de diferents retransmissions en la que tenen en compte els TTI d'espera d'una retransmissió a l'altre. L'expressió és les següent on  $n$  és el número de retransmissions.

$$\text{Retard}_{\text{UL-HARQless}}(\text{ms}) = 11 \text{ TTI} + (2 \cdot n) \text{ TTI} \quad (4.5)$$

En la **taula 4.4.** podem apreciar com els valors del retard obtingut un cop s'ha produït la primera retransmissió en aquesta apreciem la millora en comparació amb HARQ.

**Taula 4.4.** Latència en el pla d'usuari en UL amb HARQless

	TTI = 1 ms	TTI = 0,5 ms	TTI = 0,17 ms
Transmissió Inicial	12	6	2,04
1a Retransmissió	14	7	2,38
2a Retransmissió	16	8	2,72
3a Retransmissió	18	9	3,06

Amb les noves configuracions de la trama LTE el retard en el UL i DL s'ha aconseguit una gran reducció del retard. Si apliquem la tècnica de HARQless la millora en la reducció és encara superior.

Si tenim en compte el cas d'una transmissió inicial satisfactòria amb un TTI de 0,17 ms el valor per el UL (2,04) i DL (0,68) amb HARQ i HARQless es troben per sota de els 3 ms, valor de latència màxim per aplicacions com l'alineament de trajectòria d'emergència i la percepció col·lectiva de l'entorn. En cas de què independentment sigui necessària una retransmissió, si aquesta es produeix en el UL o en el DL el valor dels 3 ms seria superat.

Alhora cal considerar que la xarxa LTE té un valor típic de BLER de  $10^{-1}$  i que el valor típic necessari per les comunicacions URLLC és de  $10^{-5}$ .

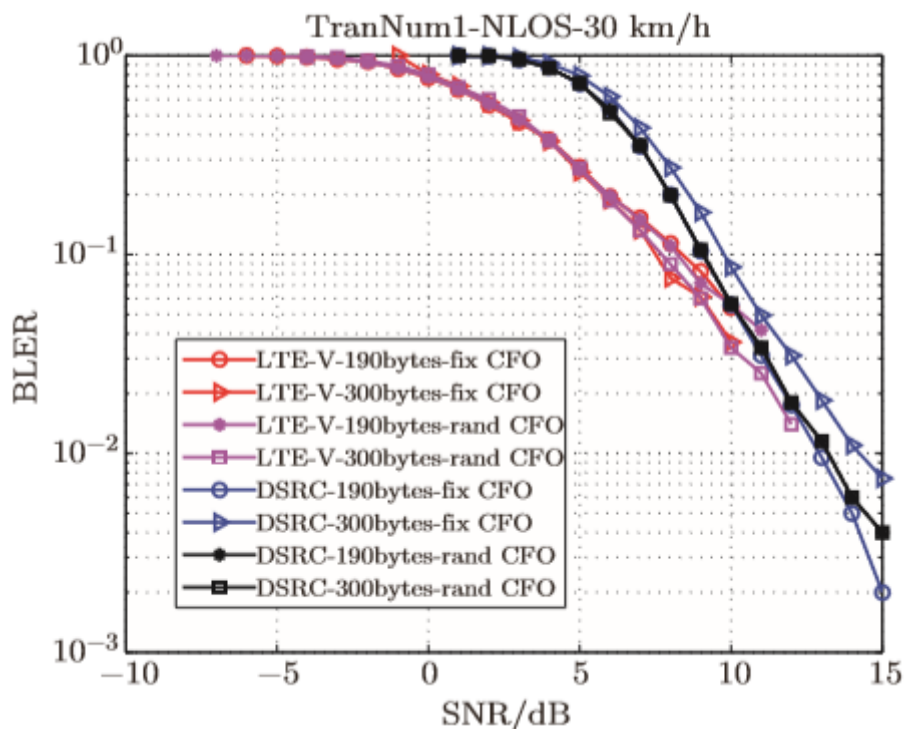
## 5. AVALUACIÓ DEL RETARD PER A V2I EN ESCENARIS REALISTES

En la primera part d'aquest punt es presenten dos possibles escenaris en comunicacions V2I amb diferents condicions. El primer escenari representa una comunicació entre vehicle i estació base amb LOS amb una velocitat del vehicle de 120km/h. El segon escenari presenta el mateix tipus de comunicació però amb NLOS i una velocitat de 30km/h. En els dos casos s'ha utilitzat un TTI de 1 ms.

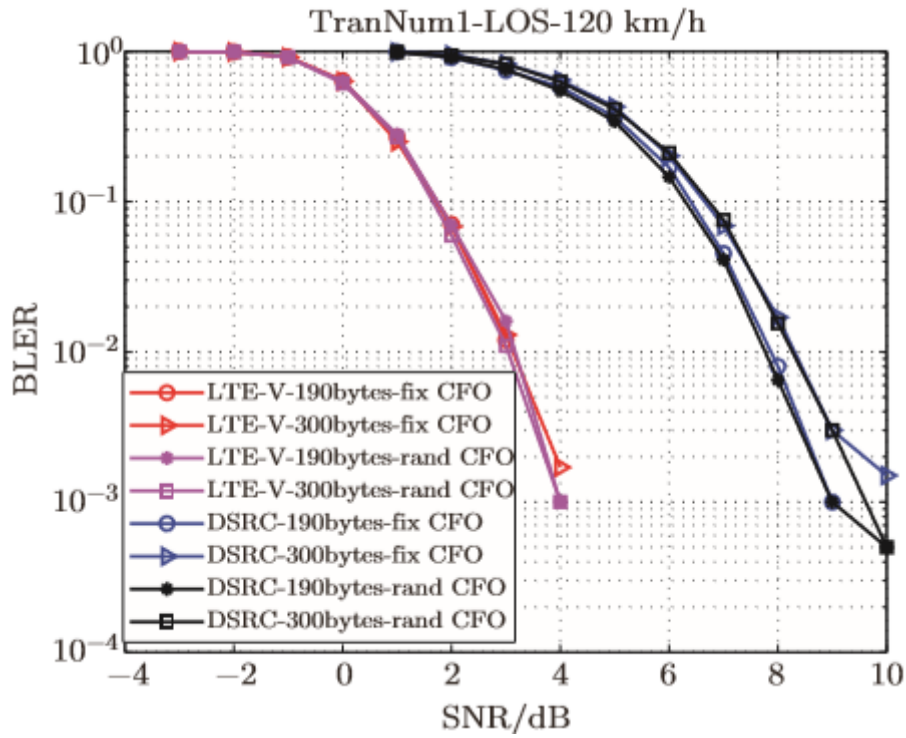
En la segona part d'aquest punt realitzarem el càlcul del retard en una comunicació V2I a partir dels nivells de potència radiats per una estació base en un escenari de Barcelona. Es tindrà en compte un escenari amb LOS i un segon amb NLOS.

### 5.1. BLER-SNR-RETARD

A partir de l'estudi [13] que realitza una comparació entre LTE i DSRC (Dedicated Short Range Communications) on s'avaluen el comportament dels dos sistemes per a comunicacions V2X hem extret els valors de BLER respecte la SNR per LTE per els dos escenaris prèviament esmentats. Les figures amb la informació de la BLER respecte la SNR són la **figura 5.1** i la **figura 5.2** mostrades a continuació.



**Figura 5.1** Relació SNR / BLER amb NLOS a 30 km/h



**Figura 5.2** Relació SNR-BLER amb LOS a 120 km/h

A partir d'aquestes figures hem extret la pendent per poder tenir la BLER en funció de la SNR. Els punts escollits per calcular la pendent per la **figura 5.1** són:  $X_1=0$  dB;  $X_2=10$  dB;  $Y_1=10^0 = 1$ ;  $Y_2=2 \cdot 10^{-2}$ ;

$$\text{BLER|dB} = m \cdot \text{SNR|dB} \quad (5.1)$$

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} \quad (5.2)$$

Adequant els valors  $Y_1$ ,  $Y_2$  a dB i substituint en les expressions obtenim la BLER en funció de SNR per la **figura 5.1**

$$Y_1 = 10 \cdot \log_{10} 1 = 0 \text{ dB};$$

$$Y_2 = 10 \cdot \log_{10} 2 \cdot 10^{-2} = -17 \text{ dB};$$

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} = \frac{-17 - 0}{10 - 0} = -1,7 \text{ dB}$$

$$\text{BLER|dB} = -1,7 \cdot \text{SNR|dB}; \text{ expressat en lineal} \rightarrow \text{BLER} = 10^{\frac{-1,7}{10} \cdot \text{SNR}}$$

Per la **figura 5.2** realitzem el mateix procediment per obtenir la BLER en funció de la SNR els valors escollits són:  $X_1 = 0$  dB;  $X_2 = 4$  dB;  $Y_1 = 10^0 = 1$ ;  $Y_2 = 10^{-3}$ ; Convertint els valors  $Y_1, Y_2$  a dB els valors són:

$$Y_1 = 10 \cdot \log_{10} 1 = 0 \text{ dB};$$

$$Y_2 = 10 \cdot \log_{10} 10^{-3} = -30 \text{ dB};$$

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} = \frac{-30 - 0}{4 - 0} = -7,5 \text{ dB}$$

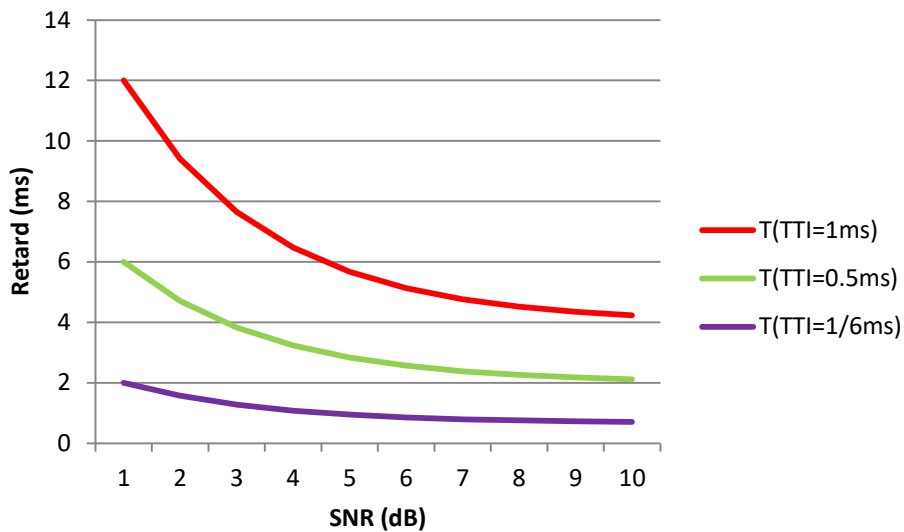
$$\text{BLER|dB} = -7,5 \cdot \text{SNR|dB}; \text{ expressat en lineal} \rightarrow \text{BLER} = 10^{\frac{-7,5}{10} \cdot \text{SNR}}$$

Per tal d'expressar el retard de la comunicació amb l'ús del procediment HARQ i veure com varia en funció del nivell de SNR s'han adaptat les expressions mostrades en el punt anterior. L'antic valor de  $n$  repeticions es substitueix per la BLER. De manera que les expressions finals per el UL i DL són les següents per el cas de NLOS a 30 km/h.

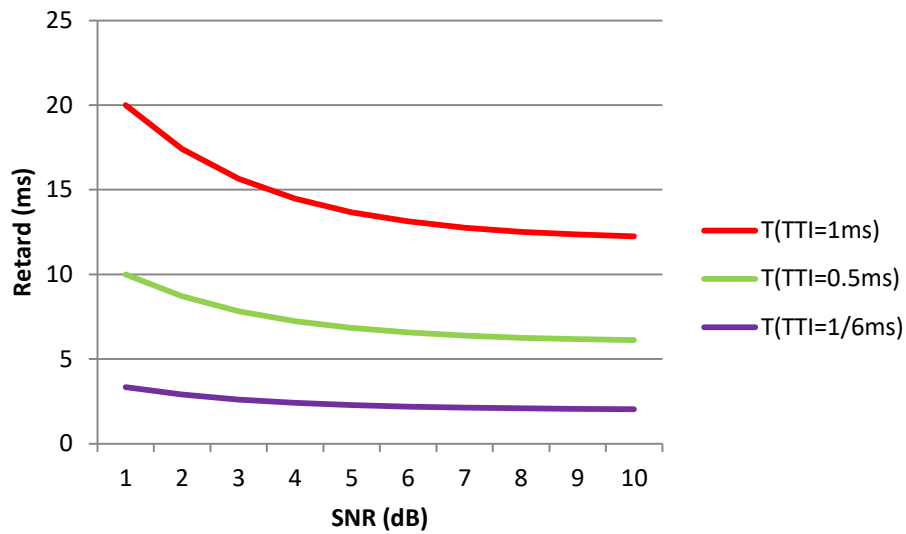
$$\text{Retard}_{\text{DL-HARQ}}(\text{ms}) = 4 \text{ TTI} + 10^{\frac{-1,7}{10} \cdot \text{SNR}} \cdot 8 \text{ TTI}$$

$$\text{Retard}_{\text{UL-HARQ}}(\text{ms}) = 11 \text{ TTI} + \left(1 + 10^{\frac{-1,7}{10} \cdot \text{SNR}} \cdot 8\right) \text{ TTI}$$

A continuació en la **figura 5.3** i en la **figura 5.4** es mostren les relacions entre el Retard i la SNR tant per el UL com el DL i es comparen per tres valors diferents de TTI.





**Figura 5.3** Relació SNR-Retard en DL a 30km/h amb NLOS**Figura 5.4** Relació SNR-Retard en UL a 30km/h amb NLOS

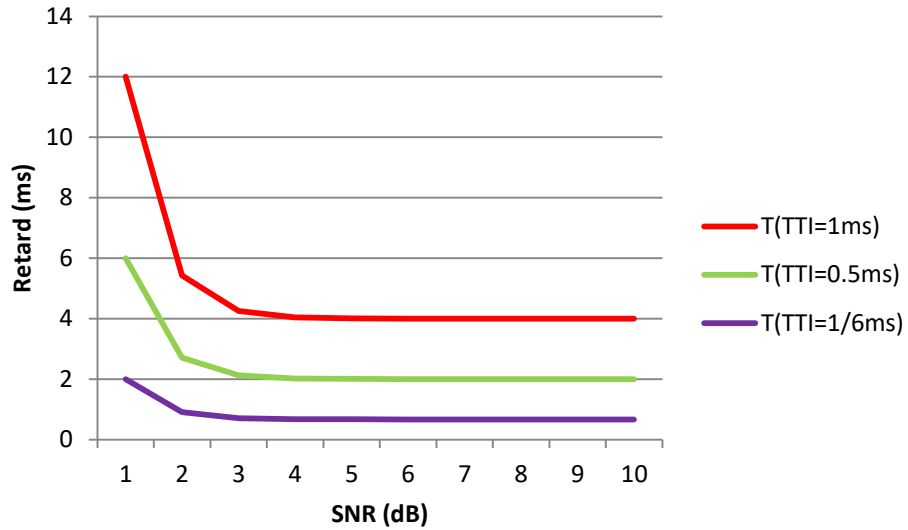
Tant per el UL com el DL si ens fixem en el valor de SNR = 3 dB (valor per el qual implica que tindrem el doble de nivell de senyal respecte el nivell de soroll), quan major és el TTI la disminució del retard és més significativa. Si partim del cas de TTI menor, per millor SNR que tinguem la reducció del retard no serà tant significativa ja que ens acostem al límit inferior de l'expressió formulada.

Per el cas de l'escenari amb LOS i velocitat de 120km/h les expressions finals per el UL i DL són les següents:

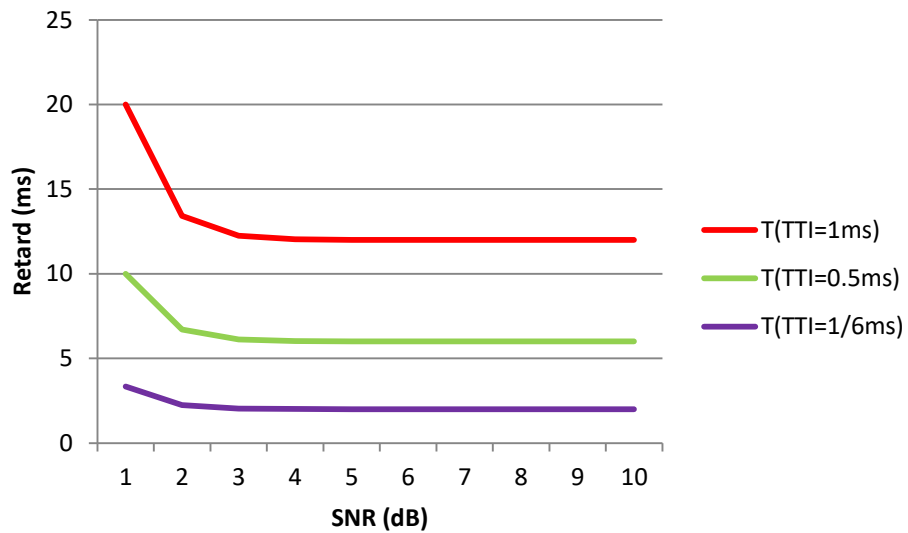
$$\text{Retard}_{\text{DL-HARQ}}(\text{ms}) = 4 \text{ TTI} + 10^{\frac{-7,5}{10} \cdot \text{SNR}} \cdot 8 \text{ TTI}$$

$$\text{Retard}_{\text{UL-HARQ}}(\text{ms}) = 11 \text{ TTI} + \left(1 + 10^{\frac{-7,5}{10} \cdot \text{SNR}} \cdot 8\right) \text{ TTI}$$

A continuació en la **figura 5.5** i en la **figura 5.6** es mostren les relacions entre el retard i la SNR tant per el UL com el DL i es comparen per tres valors diferents de TTI.



**Figura 5.5** Relació SNR-Retard en DL a 120km/h amb LOS



**Figura 5.6** Relació SNR-Retard en UL a 120km/h amb LOS

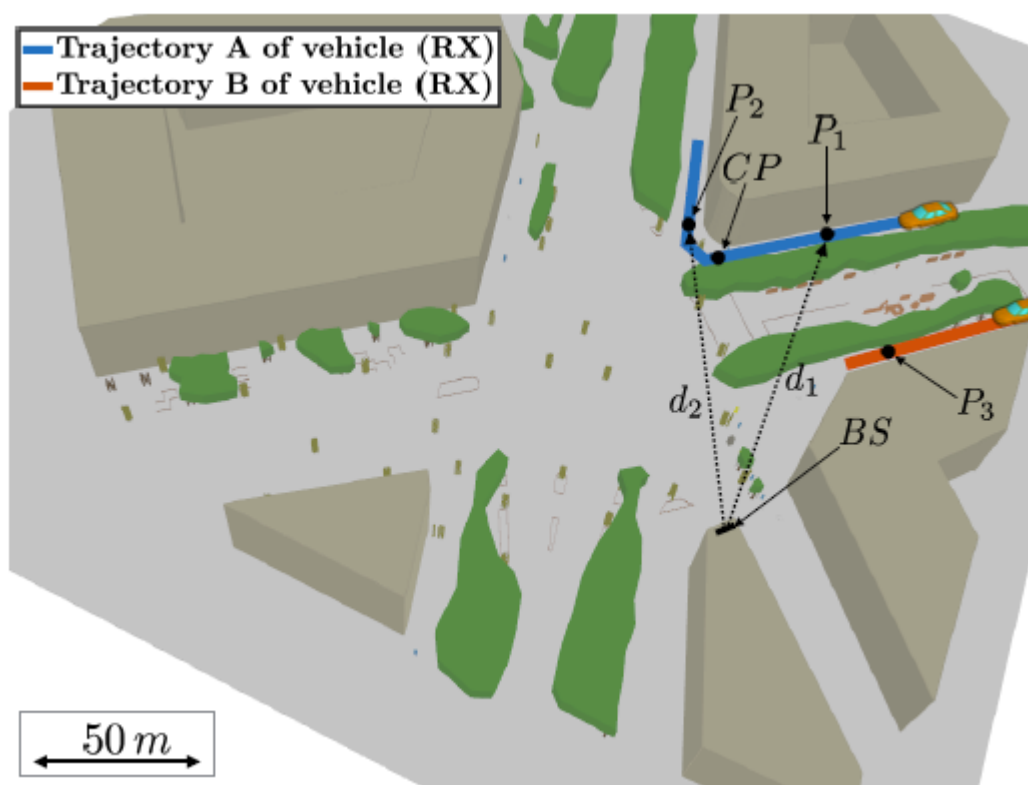
Degut a què disposem de LOS el valor de la BLER és major per el mateix nivell de SNR respecte el cas de NLOS. Això en termes de retard implica que amb una SNR menor el retard decau més ràpidament. En aquest cas ja que la BLER és millor, s'assoleix el límit de l'expressió abans que amb NLOS.

## 5.2. Simulació Eixample

Per tenir un cas més realista en l'anàlisi del retard V2I realitzarem el càlcul del retard en l'àrea urbana de Barcelona (Passeig Sant Joan amb la Diagonal). En concret s'analitza la intersecció de l'eixample formada per dos carrers amb formes de gairebé 90 graus.

L'entorn està format per el pla de terra d'asfalt, cinc edificis, semàfors i arbres. L'altura dels edificis són de 18 m i l'estació base (BS) es col·loca al terrat arribant a una alçada de 21 m. Els materials dels objectes es considerant realistes, amb edificis de formigó, semàfors de metall i arbres de fusta amb vegetació a la part superior que permet que els raigs passin a través d'aquests, produint una atenuació.

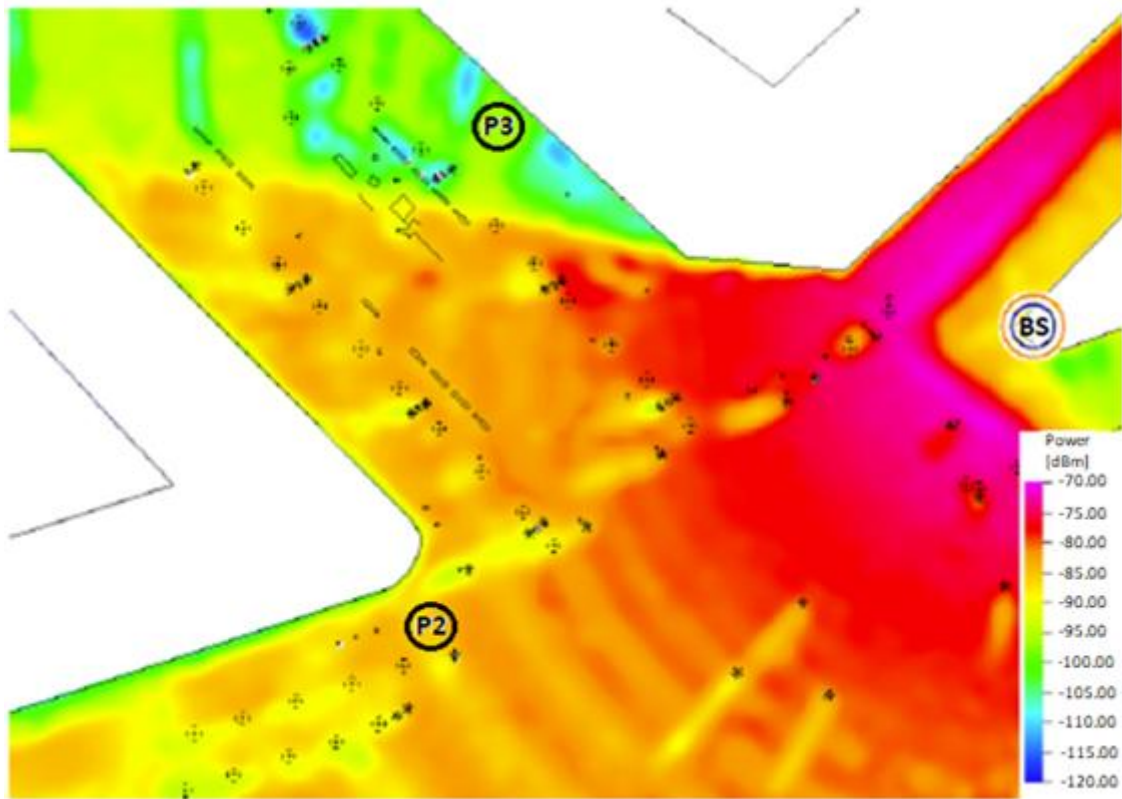
En la següent **figura 5.7** es mostra el punt 2 ( $P_2$ ) que correspon amb el punt amb LOS i el punt 3 ( $P_3$ ) que correspon amb el punt amb NLOS.  $P_2$  es troba a 85,4 m de l'estació base en línia recta i el  $P_3$  a 77 m



**Figura 5.7** Escenari d'intersecció en l'eixample de Barcelona[14]

En la simulació el nombre màxim d'interaccions és de tres reflexions, dos difraccions i una transmissió per cada raig. En total es tenen en compte fins a 20 camins diferents des de l'estació base fins cada posició. La estació base

transmet a una potència de 0 dBm a 3.6 GHz. En la **figura 5.8** es mostra el nivell de potència en l'escenari.



**Figura 5.8** Nivell de potència[14]

A partir del nivell de potència en cadascun dels punts calcularem les respectives SNR. Els valors de xifra de soroll (NF) i ample de banda s'han considerat els valors de l'estudi anterior [13].  $NF = 9\text{ dB}$  i  $BW = 10\text{ MHz}$

En  $P_2$  el nivell de potència és de -85 dBm a partir de la següent expressió calcularem la potència de soroll:

$$SNR[dB] = P_{RX} - P_N \quad (5.3)$$

On la potència de soroll s'obté a partir de:

$$P_N = K \cdot T_e \cdot BW, \text{ amb } K = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K} \quad (5.4)$$

El valor de la temperatura equivalent s'obté a partir de:

$$T_e = T_0(F - 1), \text{ amb } T_0 = 290 \text{ K} \quad (5.5)$$

El valor de la xifra de soroll en lineal l'obtenim a partir de:

$$NF = 9 \text{ dB} \rightarrow F = 10^{\frac{9}{10}}$$

Substituïm els valors en les respectives expressions i obtenim el valor de temperatura equivalent.

$$T_e = 290 \left( 10^{\frac{9}{10}} - 1 \right) = 2013,55 \text{ K}$$

Un cop tenim el valor de la temperatura equivalent la substituïm en l'expressió 5.1 i obtenim la potència del soroll.

$$P_N = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} \cdot 2013,55 \text{ K} \cdot 10 \text{ MHz} = 2,78 \cdot 10^{-13} \rightarrow -95,56 \text{ dBm}$$

Finalment la SNR en  $P_2$  és la següent:

$$SNR|_{\text{db}} = P_{RX} - P_N = -85 \text{ dBm} - (-95,56 \text{ dBm}) = 10,56 \text{ dB}$$

A partir del valor de la SNR en  $P_2$  i considerant un TTI de 1 ms el valor del retard és el següent:

$$\text{Retard}_{\text{DL-HARQ}}(\text{ms}) = 4 \text{ TTI} + 10^{\frac{-7,5}{10}} \cdot SNR \cdot 8 \text{ TTI}$$

$$\text{Retard}_{\text{DL-HARQ}}(\text{ms}) = 4 \text{ TTI} + 10^{\frac{-7,5}{10}} \cdot 10^{\frac{10,56}{10}} \cdot 8 \text{ TTI} = 4 \text{ ms}$$

En el cas de  $P_2$  el retard de la comunicació és de 4 ms per tant aquest tipus de comunicació no seria vàlida per algunes aplicacions considerades com l'alineament de trajectòria d'emergència encara que si per aplicacions amb un requeriment de latència més relaxada.

En  $P_3$  el nivell de potència és de -97 dBm la seva respectiva SNR és la següent:

$$SNR|db = P_X - P_N = -97 \text{ dBm} - (-95,56 \text{ dBm}) = -1,44 \text{ dB}$$

Per tant la comunicació sense LOS no seria possible ja que tenim una SNR menor de zero. Aquesta comunicació si que seria possible si consideréssim un valor major de potència de transmissió de l'estació base.

## 6. CONCLUSIONS I TREBALLS FUTURS

### 6.1. Conclusions

Un cop realitzat aquest treball s'ha pogut veure com la latència en les comunicacions entre vehicles és un requeriment vital ja que a mesura que empitjora la latència la seguretat entre vehicles disminueix.

S'han vist els principals sensors que formen part del vehicle autònom i els diferents nivells d'autonomia. Alhora hem vist quines previsions de desplegament hi ha tant als Estat Units com a la Unió Europea.

Hem justificat el valor de latència mínim per garantir la seguretat entre vehicles i s'han vist les diferents aplicacions per al vehicle autònom amb diferents requeriments de latència.

Hem analitzat els retards que es produeixen en les comunicacions amb la xarxa actual LTE. Aquests retards depenen de diferents factors com l'estat del dispositiu, si aquest es troba sincronitzat amb l'estació base o si disposa de recursos assignats per realitzar la transmissió. Hem arribat a la conclusió de què és necessari mantenir la connexió una vegada s'ha establert perquè el retard introduït per l'establiment de la connexió és el més elevat en la comunicació.

També s'han avaluat algunes millores de l'actual LTE que redueixen la latència com són l'ús d'una estructura de trama menor i un nou procediment de retransmissió de paquet en cas d'error.

Finalment hem realitzat els càlculs del retard en situacions de LOS i NLOS. A partir de la SNR i la BLER hem obtingut els valors del retard. També s'ha presentat l'escenari de l'exemple de Barcelona i a partir dels nivells de potència rebuda en l'escenari s'ha mesurat la latència en la comunicació V2I.

Es conclou que el valor de latència en les actuals xarxes no compleixen el requeriment de 1 ms necessari per els vehicles autònoms. Aquest valor està previst que s'assolirà amb l'arribada de la 5G amb mides menors de slots i subslots, gràcies a una separació entre subportadores major.

## 6.2. Treballs futurs

Un cop realitzat aquest TFG les possibilitats de continuació d'aquest treball són diverses. Seria molt interessant corroborar el treball a partir de mesures en un entorn urbà real mitjançant comunicacions amb les millores del LTE per a V2I.

En aquest treball ens hem centrat exclusivament en el retard en la comunicació però la fiabilitat d'aquesta també té una gran importància per a les comunicacions del vehicle autònom.

Tampoc s'ha tractat en cap moment el retard que es produeix en la comunicació quan s'aplica un procediment de Handover. Aquest procediment s'hauria de tenir en compte ja que les comunicacions V2I requeriran d'una ràpida assignació d'estació base degut a les velocitats que portaran els vehicles. Durant el procediment de handover en tot moment s'haurà de poder garantir una elevada fiabilitat de les comunicacions

Amb l'arribada de la 5G, tècniques com el *slicing* de la xarxa i el *Edge Computing* tindrà una gran rellevància en termes de reducció de latència en tot tipus de comunicacions de molt baixa latència. Estudiar el seu funcionament i la seva aplicació en la reducció de latència resultaria de elevat interès.

Aquests són alguns dels aspectes el quals podria donar pas a la realització d'altres treballs.



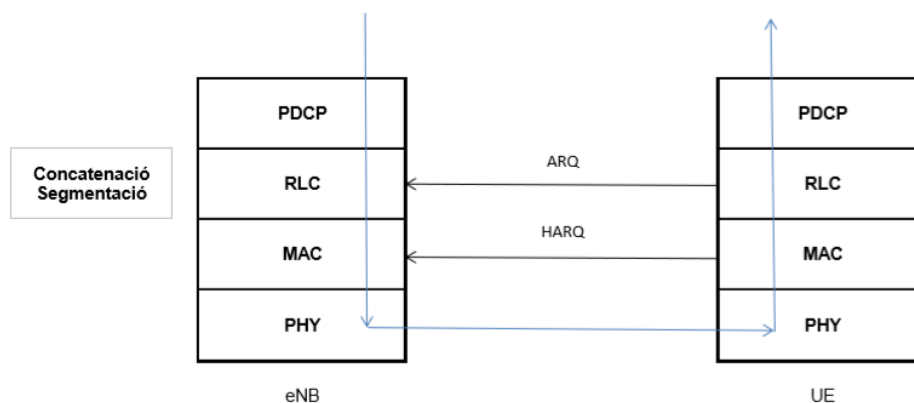
## 7. ANNEX A: PILA DE PROTOCOLS LTE

Els paquets tant en UL com en DL són processats per diverses capes del pla d'usuari en (PDCP,RLC,MAC,PHY). Tots els paquets que s'envien entre UE i eNB pateixen aquest retard independentment d'altres condicions de la xarxa.

Les diferents capes de la pila de protocols del pla d'usuari són els següents:

- *Packet data Convergence Protocol* (PDCP) és la capa responsable de la compressió i descompressió de les dades de cada paquet, gestiona els *handover*, reordena la seqüència de packet data units (PDU) durant el *handover* i realitza el xifrat i desxifrat per al pla de usuari i control junt amb la protecció de la integritat i la verificació de les dades del pla de control.
- *Radio Link Control* (RLC) és la capa encarregada de la segmentació i concatenació de las PDCP PDU per a que s'ajustin als requisits de mida de la capa MAC. Reordena els paquets rebuts desordenats i realitza *Automatic Repeat Request* (ARQ) el qual descarta el paquet i demana retransmissió d'un de nou.
- *Medium Access Control* (MAC) és la capa que distribueix els recursos de freqüència disponibles al UE actiu per permetre accedir i sincronitzar-ne amb la xarxa a través d'un procediment d'accés a la xarxa. També la capa MAC realitza les operacions de Hybrid ARQ (HARQ) per demanar retransmissió en cas de que es produeixi un error. El HARQ quan rep un paquet erroni no el descarta, el emmagatzema al buffer i quan rep el mateix paquet si aquest torna a ser erroni els intenta combinar per tenir el paquet bo.
- Capa física és la capa que rep les dades intercanviades entre UE i eNB. Utilitza un esquema d'accés múltiple OFDM en DL i un esquema FDMA en el UL. En la capa física els paràmetres de transmissió s'adapten gràcies al intercanvi de informació entre UE i eNB.

En la següent figura poden veure les capes esmentades i la seva disposició.



**Figura 9.1** Capes del pla d'usuari LTE

## 8. ANNEX B: LTE SCHEDULER

El *Scheduler* és la entitat que s'encarrega de com i quants RBs ha de repartir als diferents UEs. En LTE el *scheduling* és realitza per cada subtrama o sigui cada 1 ms. El *scheduler* realitza diferents funcions per determinar com realitzar el *scheduling* del UEs. Les funcions són les següents:

- S'encarrega de la adaptació d'enllaç per tal de seleccionar els paràmetres adients per la modulació, codificació del canal i mode de transmissió en condicions de RF.
- S'encarrega de l'assignació de recursos entre radio bearers radio del mateix UE que estan disponibles en la eNB per el DL i en el UE per el UL.
- Gestiona l'accés als recursos per a tots els UE que tenen els RRC actius.
- Gestiona el control de potència necessari per tal de proporciona el nivell adequat de SINR per assolir la velocitat de dades desitjada i també controla la interfície de les seves celles veïnes.
- Realitza les funcions de HARQ per tal de poder recuperar els errors residuals mitjançant adaptació d'enllaç.

Hi ha diferents tipus d'aplicacions les quals cada tipus requereixen d'un tipus de transmissió característica. La tolerància al retard, la mida dels paquets, les transmissions de dades periòdiques o no periòdiques... Segons aquestes característiques és determina el tipus de *scheduler* per paquet que és necessari per tal de garantir una QoS necessària per l'aplicació.

## 9. Bibliografia

- [1] <https://www.engineering.com/DesignerEdge/DesignerEdgeArticles/ArticleID/12665/The-Road-to-Driverless-Cars-1925--2025.aspx>
- [2] <http://mtri.org/automotivebenchmark.html>
- [2] Collell, M., "Requeriments de posicionament del cotxe autònom", Treball Final de Grau, EETAC, UPC, September 2018
- [3] <https://www.nhtsa.gov/technology-innovation/automated-vehicles-safety>
- [4] <https://waymo.com/journey/>
- [5] Study on enhancement of 3GPP Support for 5G V2X Services, document 3GPP Technical Report 22.886 V16.00, 3GPP, 2018
- [6] S. Elbamby, M., Perfecto, C., Bennis, M., and Doppler, K., "Towards Low-Latency and Ultra-Reliable Virtual Reality", University of Oulu, Finlàndia, 23 Jan 2018
- [7] [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S071795022012000200040](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S071795022012000200040)
- [8] Study on enhancement of 3GPP Support for 5G V2X Services, document 3GPP Technical Report 22.886 V16.0.0, 3GPP, 2018.
- [10] Cardona, N., Olmos, J.J., García, M., Montserrat, J.F., *3GPP LTE: Hacia la 4G*, Cap 8 en: "Análisis de prestaciones de LTE", pp. 307-316, 2011
- [11] Study on latency reduction techniques for LTE, document 3GPP Technical Report 36.881 V14.0.0, 3GPP, 2016.
- [12] Fehrenbach, T., Datta, R., Goktepe, B., Wirth, T and Hellge, C., "URLLC Services in 5G Low Latency Enhancements for LTE", Fraunhofer Heinrich Hertz Institute, Fraunhofer Institute for Integrated Circuits, August 2018
- [13] Jinling Hu, Shanzhi Chen, Li Zhao, Yuanyuan Li, Jiayi Fang, Baozhu Li, Shi, Y., "Link level performance comparison between LTE V2X and DSR" *Journal of Communications and Information Network* Vol.2 No.2, June 2017.
- [14] Pfadler, A., Ballesteros, C., Romeu, J., Jofre, L., "Propagation-based Performance of Hybrid MIMO Antenna Configurations for V2I Urban Communications", Submitted to IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 2019.
- [15] Lee, K., Kim, J., Park, Y., Wang, H and Hong, D., "Latency of Cellular-Based V2X: Perspectives on TTI-Proportional Latency and TTI-Independent Latency", IEEE August 2017

[16]<http://www.techplayon.com/lte-enodeb-scheduler-and-different-scheduler-type/>

[17] TaKeda, K., Hui, L and Nagata, S., "Latency Reduction Toward 5G", IEEE Wireless Communications, June 2017